



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kaivoksen ympäristönsuojelurakenteissa käytettävän moreenin vedenläpäisevyyden tarkastelu

Juha Falben

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Kaivoksen ympäristönsuojelurakenteissa käytettävän moreenin vedenläpäisevyyden tarkastelu

Juha Falben

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 129 s. + 6 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: DI Anne Tuomela

Tämän työn tavoitteena oli tutkia Agnico Eagle Finland Oy:n Kittilän kultakaivoksen ympäristönsuojelurakenteissa käytetyn moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä. Alueelle on tehty lukuisia moreenin vedenläpäisevyyden määrittämiseen liittyviä maasto- ja laboratoriotutkimuksia tässä työssä sekä aiemmin muissa yhteyksissä. Aikaisemmin mittaustuloksissa on havaittu eroavaisuuksia ja osin epäjohdonmukaisuuksia. Diplomityön tarkoitus oli löytää mitkä tekijät vaikuttavat eniten kohdealueen moreenin vedenläpäisevyyteen sekä selvittää miksi kyseiset tekijät vaikuttavat vedenläpäisevyydestä.

Moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä selvitettiin kirjallisuudesta sekä maasto- ja laboratoriotutkimusten avulla. Tutkimukset kohdistuivat rakenteilla olevan NP4-rikastushiekka-altaan alueelle. Työssä tehtyjen maasto- ja laboratoriotutkimusten lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin alueelta aiemmin tai tutkimuksen aikana muualle laboratorioanalyysiin lähetettyjen näytteiden tuloksia tai kentällä tehtyjä in situ -mittauksia. In situ -tutkimusmenetelmiin kuuluivat vedenläpäisevyyden määrittäminen Guelph-permeametrillä ja double ring -infiltrometrillä sekä tiiveyden määrittäminen hiekkavolymetrikokeella ja Troxler-laitteella. Vedenläpäisevyysskojeisiin laboratoriossa kuuluivat: vedenläpäisevyyden määrittäminen muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä, muuttuvapaineisena jäykkäseinäisessä sellissä sekä vakioapaineisena joustavaseinäisessä sellissä. Muita laboratoriotutkimuksia olivat: mikroskooppitutkimus, rakeisuuden määrittäminen seulumalla, areometrikokeella ja laserdiffraktiolla sekä vedenpidätyskyky- ja proctor-kokeita. Työssä myös tarkasteltiin rakeisuuteen perustuvien empiiristen laskentayhtälöiden soveltuvuutta moreenin vedenläpäisevyyden arviointiin. Käytetyt

laskentayhtälöt olivat Breyer, Kozeny-Carman, Hazen, Slitcher, Terzaghi ja U.S Bureau of Reclamation (USBR).

Työn tulosten perusteella voidaan todeta, että tutkitun moreenin vedenläpäisevyys on riippuvainen useasta tekijästä, eikä yksittäisen asian mittaaminen normaalisti riitä. Tutkituista muuttujista parhaiten kohdealueen moreenin vedenläpäisevyyden tuloksien kanssa korreloivat tiiveysaste, hienoaineksen määrä, tehokas raekoko d₁₀ sekä kyllästysaste ja vesipitoisuus tiivistettäessä. Tutkimuksissa havaittiin, että väärinkäsiteltynä moreeni voi olla taipuvainen kuivumisen aiheuttamalle eroosiolle laboratorio-olosuhteissa. Eroosiosta kärsineen moreenin mitattu vedenläpäisevyyden tulos ei kuvasta moreenisen tiivisrakenteen toimintaa kenttäolosuhteissa. Tutkimus- ja työskentelymenetelmien valinnalla huomattiin olevan vaikutusta mitattuun vedenläpäisevyyden arvoon. Eri tutkimusmenetelmillä määritetyt vedenläpäisevyyden tulokset sekä laboratorio- että in situ -olosuhteissa eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. In situ -mittauksissa saatiin keskimäärin suurempia vedenläpäisevyyden arvoja kuin laboratoriotutkimuksissa, johtuen katkaistusta rakeisuudesta ja kenttäolosuhteiden epähomogeenisuudesta. Työskentelymenetelmiä vaihtamalla samalle moreeninäytteelle saatiin yli 1000-kertainen ero vedenläpäisevyyden tulokseen. Moreenin vaihtelevien ominaisuuksien takia työstä saatuja tuloksia ei voi yleistää vastaaviin kohteisiin. Kuitenkin työssä tehtyjä huomiota voidaan käyttää apuna muissa tutkimuksissa selvittämään maa-aineksien vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä.

Asiasanat: moreeni, vedenläpäisevyys, kaivos, ympäristönsuojelurakenne

ABSTRACT

Hydraulic conductivity examination of moraine used in mine environmental protection structures

Juha Falben

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2021, 129 pp. + 6 Appendixes

Supervisor(s) at the university: M.Sc. (Tech.) Anne Tuomela

The aim of the thesis was to study the hydraulic conductivity of moraine used in mine environmental protection structures. Location for the study was Agnico Eagle Finland Oy's gold mine in Kittilä. In the area, numerous hydraulic conductivity measurements have been made for moraine, both in the field and in the laboratory. Results from these measurements have been varying and partly inconsistent. Objective was to find out which factors affect moraines hydraulic conductivity the most and figure out why do these factors affect the hydraulic conductivity results.

Factors affecting moraines hydraulic conductivity were studied from literature and by executing field investigations and on laboratory measurings. Research was targeted in NP4 tailing pond area which was being constructed during this study. In addition to the research done in the study, earlier or during this research made the laboratory and in situ investigations or measurements results were utilized. In situ research methods included hydraulic conductivity determination with Guelph-permeameter and double ring - infiltrometer, compactness evaluation with the volumeter test with sand and the Troxler-measuring device. Hydraulic conductivity research methods in the laboratory included hydraulic conductivity determination with flexible-wall permeameter with the constant head and falling-head methods and rigid-wall permeameter with the falling-head method. Other laboratory research methods were microscopical study, grain size analysis through sieving, areometer and laser diffraction and lastly water retention capacity tests and proctor-tests. Furthermore, the use of empirical equations was assessed for estimating moraines hydraulic conductivity based on grain size analysis. Used equations were

Breyer, Kozeny-Carman, Hazen, Slitcher, Terzaghi and U.S Bureau of Reclamation (USBR).

The results show that researched moraines hydraulic conductivity is depended on several factors and measuring only one property isn't normally enough. From examined factors, the best correlation to moraines hydraulic conductivity was found on the degree of compaction, fines content, effective grain size d_{10} and both water content and degree of saturation during compaction. It was noticed that when misused, the studied moraine can have the tendency to erosion caused by drying in laboratory conditions. Measured hydraulic conductivity from the eroded moraine sample no longer represents the moraine structures operation in field conditions. Selecting both research method and working technique had impact on measured hydraulic conductivity value. Hydraulic conductivity results determined on different research methods both in situ- and in laboratory conditions aren't directly proportional to each other. On average in situ hydraulic conductivity measurements were bigger than those measured in the laboratory, which was caused by cutting the grading curve and non-homogeneous conditions in the field. The same moraine sample had over thousandfold difference in the hydraulic conductivity measured, when the working technique was chanced. Due to changing the features of moraine, results from this study can't be generalized in comparable areas. However, the observation from this study can be utilized in other research regarding finding out factors affecting soils hydraulic conductivity.

Keywords: moraine, hydraulic conductivity, mine, environmental protection structure

ALKUSANAT

Tämä diplomityön on tehty AFRY Finland Oy:lle Agnico Eagle Finland Oy:n toimeksiannosta. Työ tehtiin marraskuun 2020 ja joulukuun 2021 välisenä aikana. Työn tavoitteena oli tutkia Agnico Eagle Finland Oy:n Kittilän kultakaivoksen ympäristönsuojelurakeiteissa käytettävän moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä.

Iso kiitos AFRY Finland Oy:lle ja Agnico Eagle Finland Oy:lle mahdollisuudesta tutkia tätä haastavaa ja mielenkiintoista aihetta. Työn ohjaajina AFRY Finland Oy:ltä toimivat Marko Lehmikangas ja Iida Kaikkonen. Markoa haluan kiittää yhteisistä pohdiskeluhetkistä aiheen parissa ja Iidaa maastotutkimuksissa avustamisesta. Molemipia haluan kiittää ymmärryksestä työn ja opintojen yhteensovittamisessa. Agnico Eagle Finland Oy:ltä ohjaajina toimivat Jaakko Saukkoriipi, Jussi Nousiainen ja Markus Piekkari. Heitä haluan kiittää mielenkiintoisista palavereista, yleisestä avusta ja hyvästä ohjauksesta. Lisäksi kiitokset Oulun yliopistolta ohjaajana toimineelle Anne Tuomelalle sekä laboratorioteknikolle Tuomo Pitkäselle. Haluan kiittää Annea hyvästä ohjauksesta ja kärsivällisestä opastuksesta läpi työn sekä Tuomoa tärkeästä avustamisesta laboratoriotutkimuksissa. Kiitokset kuuluvat myös työkavereilleni hyvästä työskentelyilmapiiristä.

Erityiskiitokset puolisolleni Reetalle vertaistuesta sekä diplomityössä ja opinnoissa kannustamisessa. Lisäksi kiitokset perheelleni, jotka ovat aina tukeneet ja kannustaneet minua opinnoissa eteenpäin. Lopuksi haluan kiittää ystäviäni ja koulukavereitani yhteisistä lukuhetkistä ja illanvietoista koko koulutaipaleen ajalta.

Oulu, 06.12.2021

Juha Falben

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	11
2 Moreeni Suomessa	12
2.1 Moreenin syntymekanismi	13
2.2 Moreenin geotekninen maajiluokitus	15
2.3 Moreenin vedenläpäisevyys ja siihen vaikuttavat tekijät	19
2.3.1 Tutkimusmenetelmien vaikutus vedenläpäisevyyteen	25
2.3.2 Rakeisuuteen perustuva vedenläpäisevyyden arviointi	26
3 Moreeni mineraalisena tiivisrakenteena	29
3.1 Rakentamista ohjaavat säädökset	29
3.2 Tyypilliset moreeniset tiivisrakenteet kaivannaisjätealueilla	31
3.3 Tiivisrakentamisen laadunhallinta ja valvonta (in situ)	35
3.3.1 Guelph-permeametri	36
3.3.2 Hiekkavolymetrikoe	39
3.3.3 Troxler-mittalaite	40
3.4 Muualla tehtävät laadunvarmistukseen liittyvät toimet (laboratorio)	42
3.4.1 Laserdiffraktio	45
3.4.2 Mikroskooppitutkimus	47
3.4.3 Vedenpidätyskyky	47
3.4.4 Muuttuvapainekoe joustavaseinämäisellä sellillä	50
4 Kohdealue ja tehdyt tutkimukset	54
4.1 Kohdealueen moreeni	54
4.2 In situ -tutkimukset	56
4.2.1 Site 1 -tutkimusalue	59
4.2.2 Site 2 -tutkimusalue	63
4.2.3 Site 3 -tutkimusalue	66
4.3 Laboratoriotutkimukset	68
5 Tutkimustulokset	83
5.1 In situ -tutkimukset	83

5.2 Laboratoriotutkimukset	84
5.3 Muualla tehdyt tutkimukset.....	94
6 Tulosten tarkastelu	95
6.1 Rakeisuuteen perustuva vedenläpäisevyyden arviointi.....	95
6.2 Moreenin silmämääräiset ja mikroskooppiset havainnot	96
6.3 Hienoaineksen osuuden ja raekokosuhteen vaikutus vedenläpäisevyyteen.....	97
6.4 Tiiveyden ja tiivistystyön vaikutus vedenläpäisevyyteen	105
6.5 Vedenpidätyskyvyn korrelaatio vedenläpäisevyyteen	109
6.6 Tutkimusmenetelmien vaikutus ja vedenläpäisevyyden arviointi	110
7 Johtopäätökset	114
8 Yhteenveto	117

LÄHDELUETTELO

LIITEET:

Liite 1. Yleiskartta tutkimusalueesta.

Liite 2. Proctor-kokeet.

Liite 3. Rakeisuuskäyrät.

Liite 4. Vedenläpäisevyys muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä.

Liite 5. Vedenläpäisevyyden arviointi rakeisuuteen perustuvilla laskentamenetelmillä.

Liite 6. Muualla tehdyt laboratorio- ja in situ -tutkimukset.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	kappaleen profiilin tai alueen pinta-ala
A _b	byretin vesisäiliön poikkipinta-ala
BAT	parhaita käyttökelpoisia tekniikoita
BGM	bitumigeomembraani
C	lajittuneisuusaste
C ₁	muotokerroin
C _u	raekokosuhde
D	tiiveysaste
D _{max}	rakeiden enimmäishalkaisija
d ₁₀	10 % läpäisyä vastaava raekoko
d ₂₀	20 % läpäisyä vastaava raekoko
d ₂₅	25 % läpäisyä vastaava raekoko
d ₅₀	50 % läpäisyä vastaava raekoko
d ₆₀	60 % läpäisyä vastaava raekoko
d _a	rakeiden halkaisija
d _e	tehokas rakeiden halkaisija
g	putoamiskiihtyvyys
H	paine-ero virtausmatkan päiden välillä
H _k	hiekkamoreeni
H _n	näytteen korkeus
H ₁	vesipatsaan korkeus
hkSiMr	hiekkainen silttimoreeni
hkSrMr	hiekkainen soraamoreeni
h ₁	vedenpaineen muutos etubyretissä tietyllä ajanjaksolla
h ₂	vedenpaineen muutos takabyretissä tietyllä ajanjaksolla
JF	tässä työssä tehdyt laboratorio ja in situ -tutkimukset
K _{fs}	saturoituneen tilan vedenläpäisevyys
k	vedenläpäisevyys
L	virtausmatka
LAB1-4	muualla tehdyt laboratoriotutkimukset
m	näytteen massa

m_v	veden massa
m_k	kuivan näytteen massa
n	huokoisuus
Q	virtaama
Q_1	Guelph permeametrin yksipaine-menetelmässä käytetty tekijä
R_1	veden pinnankorkeuden muutosaste
R_T	veden viskositeetin korjauskerroin
r	kairareian säde
$S(1)P(1)$	site-tutkimusalueen numero ja tutkimuspisteen numero
Si	siltti
$siHkMr$	silttinen hiekkamoreeni
$SiMr$	silttimoreeni
$srHkMr$	sorainen hiekkamoreeni
$SrMr$	soramoreeni
V	kokonaistilavuus
v	virtausnopeus
v_r	rakeen laskeutumisnopeus
w	vesipitoisuus
w_{opt}	optimivesipitoisuus
Sr	sora
α^*	mikroskooppisen kapillaarisuuden pituuskerroin
γ	tilavuuspaino
γ_d	kuivatilavuuspaino
$\gamma_{d,max}$	maksimikuivatilavuuspaino
γ_s	kiviaineiden tilavuuspaino
μ	dynaaminen viskositeetti
μ_w	veden viskositeetti
ν	kinemaattinen viskositeetti
ρ	nesteen tiheys
ρ_s	kivirakeiden tiheys
ρ_w	veden tiheys

1 JOHDANTO

Moreenia käytetään kaivoksilla ympäristönsuojelurakenteiden rakennusmateriaaleina monissa rakenteissa. Näitä rakenteita ovat esimerkiksi maapato-, pohja-, pinta-, peite- ja sulkurakenteet. Erilaisissa standardeissa ja ohjeissa on määritelty vaadittavia ominaisuuksia käytettäviltä materiaaleilta, kuten hydraulisia ominaisuuksia. Moreeni toimii rakenteissa yleensä mineraalisena tiivistyskerroksena. (Suomen ympäristökeskus 2002) Ympäristönsuojelurakenteissa vedenläpäisevyys on hyvin tärkeä tekijä tuntea, jotta rakenteiden toiminnallisilta ongelmilta välttyttäisiin. Tiivisterakenteissa vedenläpäisevyyden toivotaan olevan mahdollisimman pieni. (SGY 2008)

Vedenläpäisevyyden arviointi voi tunnetusti olla haastavaa ja tulokset voivat olla vaihtelevia. Riippuen onko kyseessä maasto- vai laboratorio-olosuhteissa tehtävä mittaus, voi vedenläpäisevyyden arvoissa olla huomattavia eroja. (Suomen ympäristökeskus 1995) Moreenin vaihtelevan syntymekanismin ja sekalaisen koostumuksensa takia, niitä voi esiintyä hyvin monessa erilaisessa muodossa. Kahdella moreeniksi luokitellulla maalajilla voi olla hyvin vaihtelevat ominaisuudet. (Rantamäki et al. 1979) Moreenin vedenläpäisevyyden tarkasteluissa on siis hyvin tärkeää tietää, mitkä moreenin ominaisuudet vaikuttavat sen vedenläpäisevyyteen eniten sekä mitkä tutkimusmenetelmät ovat soveltuvia sen mittaamiseen (Suomen ympäristökeskus 1995).

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia Agnico Eagle Finland Oy:n Kittilän kultakaivoksen ympäristönsuojelurakenteissa käytetyn moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimukseen kuului moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavien tekijöiden selvittäminen kirjallisuuden perusteella sekä maasto- ja laboratoriotutkimuksia. Tarkemmin tutkimusten kohdealue sijaitsi Kittilän kaivoksen pohjoisosassa sijaitsevalla NP4-rikastushiekka-altaan alueella, joka tämän diplomityön tekohetkellä oli rakenteilla. Työssä hyödynnettiin alueelta aiemmin tai tutkimuksen aikana muualle laboratorioanalyysiin lähetettyjen näytteiden tuloksia tai kentällä tehtyjä in situ -mittauksia. Lisäksi työssä tarkasteltiin moreenin vedenläpäisevyyden arviointia rakeisuuteen perustuvilla empiirisillä laskentayhtälöillä. Työn tavoitteena oli selvittää mitkä tekijät vaikuttavat eniten kohdealueen moreenin vedenläpäisevyyteen sekä selvittää miksi kyseiset tekijät vaikuttavat vedenläpäisevyyden tulokseen.

2 MOREENI SUOMESSA

Moreeni on Suomen yleisin ja vanhin maalaji, joka peittää maamme pinta-alasta yli 50 % (Koivisto 2004). Maalajina se on lajittumatonta, eli se sisältää eri määrissä kaikkia raekokoja savihiukkasista lohkarisiin (Korhonen et al. 1974). Moreenin ominaisuudet ovat sen vuoksi vaihtelevampia kuin minkään muun maalajin, kuten perinteisesti lajittuneiden siltin, hiekan tai soran, minkä takia ne luokitellaan Suomessa erikseen (Jääskeläinen 2014). Moreeni voidaan luokitella sen mukaan, mitä lajitetta se sisältää runsaimmin. Yleisin Suomessa esiintyvistä moreeneista on hiekkamoreeni. (Korhonen et al. 1974) Perinteisen raekoostumuksen lisäksi moreeneja voidaan luokitella monella eri tavalla. Näitä ovat esimerkiksi niiden alkuperä, kerrostumispaikka ja -tapa sekä mineraali- ja kivilajikoostumus (Johansson & Kujansuu 2005).

Moreenikerrostumien paksuus vaihtelee Suomessa huomattavasti. Tavallisesti niitä esiintyy tasaisilla alueilla, laaksoissa ja vaarojen alarinteillä kallionpintaa peittävänä muutaman metrin paksuisina kerroksina. (Johansson & Kujansuu 2005) Rannikoilla moreenikerrostumat esiintyvät paksuudeltaan keskimääräistä ohuempina, noin 0,5–1 metrin kerroksina (Rantamäki et al. 1979). Tunturien ja korkeiden mäkien päältä moreenipeite saattaa puuttua kokonaan (Johansson & Kujansuu 2005). Tyypillisesti moreenikerrostumat peittyvät jääkauden jälkeisenä aikana syntyneiden nuorempien maalajien alle (Rankama et al. 1964). Suomen maassa esiintyy moreenimaa-aineksien lisäksi lukuisia moreenimuodostelmia, jotka eroavat toisistaan niin syntytapansa yksityiskohdilta, kuin rakenteeltaan (Rantamäki et al. 1979). Joissakin muodostumissa moreenikerroksen paksuus voi olla jopa kymmeniä metrejä (RIL 1985). Yhden moreenimuodostelman sisällä voi olla merkittäviä raekoostumuksen vaihteluja, jotka riippuvat ensisijaisesti moreenimuodostelman tyypistä sekä rakenteesta (Johansson & Kujansuu 2005).

Väritään moreenit ovat harmaan ja ruskean sävyisiä sekä hyvin vanhaa moreenia voi esiintyä myös sinertävänä (Korhonen et al. 1974). Harmaita sävyjä esiintyy yleensä syvemmällä moreenikerrostumissa, missä väri vastaa Suomen kallioperän mineraalien jauhetun seoksen väriä (GTK 2005). Pintakerroksissa moreenin ruskehtava sävy liittyy pohjaveden pinnan yläpuolella olevaan raudan hapettumiseen, mikä värjää maa-ainesta (Johansson & Kujansuu 2005).

Savi ja hienoaines ovat yleensä tiiviisti kiinni moreenin sisältämissä kivissä, joka tekee siitä tahraavaa ja kuivana pölyävää (Korhonen et al. 1974). Tämä yksityiskohta erottaaperinteisen moreenin muista lajittuneista muodostumista, joissa kivet ovat yleensä puhtaamman oloisia ja pyöristyneempiä (Koivisto 2004). Moreenien sisältämät kivet ja pienet mineraalirakeet ovat tyypillisesti kulmikkaita ja särmikkäitä sekä pieneltä osin pyöristyneitä (Koivisto 2004). Moreenien hienojen lajitteiden mineraalirakenteissa esiintyy yleensä kiille-, kvartsi-, maasälpä-, ja amfibolimineraalirakeita. Raekoon vielä pienentyessä, kiillemineraalien ja muuttuneiden mineraalien osuus kasvaa. (RIL 1985)

2.1 Moreenin syntymekanismi

Moreeniksi kutsutaan jäätiköiden kuljettamaa ja murskaamaa lajittumatonta maa-ainesta, jota esiintyy maailmalla vain paikoissa, missä on ollut jäätiköitä (Korkiala-Tanttu et al. 2008). Se on jäätikkösyntyinen maalaji eli se kuuluu glasiaalisiin muodostelmiin (Rantamäki et al. 1979). Suomessa lämpimiä jaksoja, jäätiköitymisiä ja jääkausia on tapahtunut useita kertoja. Viimeisimmällä Veiksel-jääkaudella on ollut suuri vaikutus Suomen maaperän muodostumiseen sekä geologisiin tapahtumiin. (Jääskeläinen 2014) Veiksel-jääkausi oli noin 115 000–11 500 vuotta sitten ja sisälsi useita kylmempiä sekä lämpimiä jaksoja. Myöhäis-Veikselin aikaan noin 25 000–11 500 vuotta sitten, jäätikkö peitti koko Suomen noin 2–3 kilometrin paksuisena patjana. Suurin osa Suomen moreeneista muodostui deglasiaation aikana, kun jää lopulta vetäytyi maasta. (Koivisto 2004)

Kylmempien ja lämpimämpien kausien takia, jäätikön liike oli vuorotellen etenevää ja vetäytyvää luode-kaakko suunnassa (Rantamäki et al. 1979). Jäätikön liikkeestä on esitetty useita teorioita, mutta tiedettävästi liike koostui pääosin jäätikön sisäisistä liikkeistä ja liukumisesta maankamaraa pitkin. Liukumisen mahdollisti jäätikön pohjan sula tila, mikä johtui jäätikön muodostamasta valtavasta paineesta sekä maaperästä hohkaavasta lämmöstä. Jään sisäiset liikkeet johtuivat sen pinnan kaltevuudesta, mistä syntyi epätasaisia jännitteitä ja näin liikettä. (Jääskeläinen 2014) Moreenin ominaisuuksien vaihtelu johtuu jäätikön liikkeen dynamiikasta sekä siinä olevan aineksen laadusta, kulkeutumisesta ja kerrostumistavasta (Koivisto 2004). Moreeniin on sekoittunut jääkautta edeltäviä kallion pinnan maalajeja sekä kallioperän rapautumistuotteita (Rantamäki et al. 1979). Kerrostumis- ja kulkeutumisolosuhteista riippuen moreeniin on voinut sekoittua lajittuneita maa-aineksia (GTK 2005). Tästä

johtuen se sisältää vaihtelevasti erikokoisia kiviaineksia (Rankama et al. 1964). Kiviaineksien kokoon ja pitoisuuksiin vaikuttaa huomattavasti kallioperän kivilajikoostumus (Korkiala-Tanttu et al. 2008). Rapautumatonta kiviainesta sisältävän moreenin rakenne viittaa siihen, että aikaisemmat jääkaudet olivat kuluttaneet jo rapakallion pois, jolloin viimeisimmän jääkauden kulutus kohdistui terveeseen peruskallioon (GTK 2005). Jään liikkeen suuret voimat irrottivat kalliosta suuria lohkarkeit, joita se murskasi pienemmiksi kappaleiksi matkan edetessä (Koivisto 2004). Kasautumistapansa mukaan, moreenit jaetaan jäätikön pohjalla kulkeutuneeseen pohjamoreeniin sekä jäätikön sisä- ja pintaosissa kulkeutuneeseen pintamoreeniin (Korkiala-Tanttu et al. 2008).

Alueiden topografialla oli hyvin suuri merkitys moreenin kulkeutumisen pysähtymiseen, sillä jää liikkui helpommin alamäkeen kuin ylämäkeen. Suurin osa moreeniaineksesta kulkeutui jään ja kallioperän välisessä vyöhykkeessä. Tässä vyöhykkeessä jään ja maaperän väliin syntyi suuri kitka, joka heikensi maa-aineksen kulkeutumista. Lopulta kitka pysäytti jään liikkeen kokonaan ja moreeni kerrostui paikalleen pohjamoreeniksi. (Koivisto 2004) Pohjamoreenia esiintyy kallionpintaa myötäilevänä aaltoilevana patjana ja se on Suomessa esiintyvistä moreenikerrostumista yleisin (Rantamäki et al. 1979).

Pohjalla liikkumisen lisäksi, moreenia kohosi jään sisäisten virtauksen mukana jäätikön pinta- ja sisäkerroksiin (Korkiala-Tanttu et al. 2008). Esimerkiksi jään kohdatessa vastarinteen, suuntautui jään liike loivasti ylöspäin, mikä sai nostettua kiviainesta ylempiin kerroksiin. Ylemmissä kerroksissa kulkeutunut kiviaines liikkui pidempiä matkoja, minkä aikana se murskaantui enemmän. Aktiivisen mannerjään vetäytyessä osia sen reunoista irtosi, ja ne passivoituivat ja jäivät paikoilleen. Tämän irtautuneen jääkerroksen alla, sisällä ja päällä oli maa-aineksia, joiden liike jäätikön mukana pysähtyi. (Koivisto 2004) Pintamoreeni on syntynyt näistä jäätikön päällä ja yläosissa olleista aineksesta, jotka jäätikön sulaessa ovat laskeutuneet likimain paikalleen (Jääskeläinen 2014). Tämän takia pintamoreenia tavataan yleensä kerrostuneena pohjamoreenin päällä (Rantamäki et al. 1979).

Geoteknisesti moreeniaineksia on vaikea erottaa toistaan, minkä takia moreeneja kuvataan usein niiden muodon ja esiintymistavan perusteella moreenimuodostelmina (RIL 1985). Suomessa moreeni sanaa käytetään kuvaamaan sekä moreeniainesta että moreenimuodostelmia. Moreenimuodostelmat voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan, jotka

ovat jäätikön reunassa, reunavyöhykkeessä sekä jäätikön alla syntyneet muodostelmat. Yksittäisiä muodostelmia ei yleensä kuvata erikseen, koska muodostelmat saattavat helposti vaihtua normaaliin pohjamoreeniin. Muodostelmien nimeämisen lähtökohtana on yleensä rajattava alue, missä moreenin maastonmuodot vastaavat toisiaan. Näitä muodostelmia ovat esimerkiksi drumliinit, kumpumoreenit ja reunamoreenit. (Johansson & Kujansuu 2005) Drumliinimuodostelmat syntyivät, kun vetäytyvä mannerjäätikkö kohtasi esteen ja pohjamoreenia kasaantui jäätikön tulosuunnan puolelle leveästi sekä jyrkästi, ja esteen jälkeen katveeseen pitkäksi ja suippenevaksi muodostelmaksi (Jääskeläinen 2014). Kumpumoreenit syntyivät jäätikön sulamisvaiheessa, kun useammat suuret jäälohkareet irtosivat mannerjäältä ja peittyivät maa-aineksen alle samalla alueella. Nämä hautautuneet jäälohkareet sulivat jättäen maastoon kumpuja ja kuoppia. Näin syntyneitä morenimuodostelmaa kutsutaan kumpumoreeniksi. (Bennett & Glasser 1996) Reunamoreenit syntyivät jäätikön vetäytymisen ja työntymisen vaiheessa, kun jäätikön sulaminen hetkeksi pysähtyi. Pysähtymisen aikana moreeniainesta valui tai työntyi jäätikön reunaa vasten muodostaen reunamoreenia. (GTK 2005)

2.2 Moreenin geotekninen maalajiluokitus

Maaperä on muodostunut lukuisista aineksista ja erilaisten tapahtumien tuloksena. Maaperä sisältää siis monia toisistaan eroavia maalajeja. Nämä maalajit poikkeavat toisistaan monilla eri tavoilla, kuten ominaisuuksiltaan, ulkonäöltään ja käyttömahdollisuuksiltaan. Tämän takia on tärkeää, että saman tyyppisiä maita kuvataan ymmärrettävästi samoilla maalajinimillä. Maalajiluokitukseksi kutsutaan keinoa, jolla erilaisia maalajeja luokitellaan yhtenäisin kriteerein. (Rantamäki et al. 1979) Suomessa on yleisesti ollut käytössä geotekninen maalajiluokitus, joka korvasi rakennusteknillisen maalajiluokituksen 70-luvulla. Geoteknisen maalajiluokituksen perustana on pääosin ollut erilaisten maalajien geologinen synty tapa ja se on ensisijaisesti laadittu Suomen maaperäolosuhteita varten. Suomessa pyritään vähitellen siirtymään Euroopan Unionin yhteiseen EN-ISO 14688-2 -luokitukseen, joka perustuu Eurokoodiin SFS EN 1997-2. Kansainvälisen yhteistyön takia luokitusten yhtenäistäminen on tärkeää, mutta ongelmaksi muodostuu se, että uudessa EN-ISO 14688-2 -luokituksessa ei tunneta moreenikäsitettä. Tästä syystä seuraavaksi on esitetty maalajien luokittelu geoteknisen maalajiluokituksen mukaan. (Ronkainen 2012)

Geotekninen maalajiluokitus jakaa erityyppiset maalajit maalajiryhmiin niiden raakoostumuksen, humuspitoisuuden ja geologisen syntyvän perusteella. Moreenit kuuluvat maalajiryhmään nimeltä moreenimaalajit, josta käytetään kirjainlyhennettä M. Ominaisuuksiltaan moreenimaalajit ovat määritelty useita eri lajitteita sisältäväksi lajittumattomiksi maalajeiksi. (Korhonen et al. 1974)

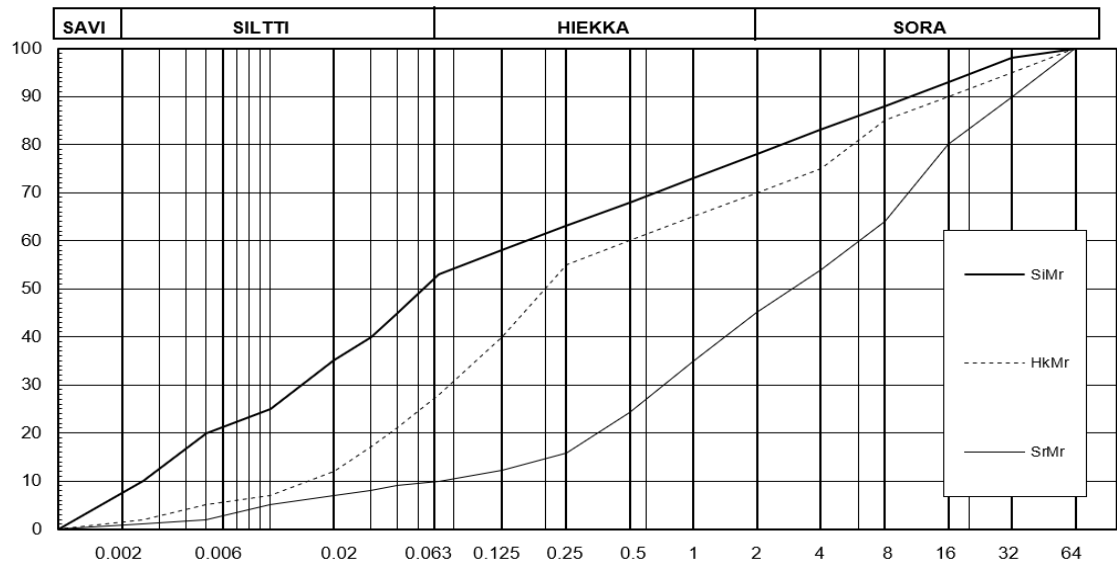
Määriteltyt maalajiryhmät jakautuvat edelleen maalajeiksi. Moreeneissa jaottelu perustuu siihen, että moreeni sisältää usein jotakin tiettyä lajitetta muita runsaammin. Moreenin maalajit ovat silttimoreeni, hiekkamoreeni ja soramoreeni, jotka voidaan määrittää käyttämällä keskimääräistä raekokoa eli d50-menetelmää. (Korhonen et al. 1974) Moreenimaalajeilla tulee aina olla lyhenteessä kaksi kirjainta, joista toinen on d50 raekokoa vastaava lyhenne (Sr, Hk, Si) ja toinen moreenia vastaava lyhenne (Mr) (SGY 2012).

Moreeninimityksen ehto täyttyy, kun siinä on vähintään 5 % silttiä ja vähintään 5 % soraa. Kuitenkin joissakin tapauksissa, tällä tavoin nimetty moreeni ei aina ole syntyvaltaan moreenia. GEO-luokitus määrittelee moreenilta vaadittavaksi syntyväksi jäätikkösyntyiset muodostumat eli glasiaaliset muodostumat. (Korhonen et al. 1974)

Silttimoreeniksi kutsutaan moreenia, jossa on vähintään 50 % hienoaainesta ja vähintään 5 % sora-ainesta. Hiekkamoreeniksi kutsutaan moreenia, jossa on sekä hienoaainesta, että sora-ainesta 5–50 % verran ja soramoreenissa taas on vähintään 50 % sora-ainesta ja vähintään 5 % hienoaainesta (Taulukko 1). Tyypilliset rakeisuuskäyrät siltti-, hiekka- ja soramoreenille löytyvät kuvasta 1. (Korhonen et al. 1974) GEO-luokituksen puolesta Suomessa esiintyvistä moreeneista noin 75 % kuuluu hiekkamoreeneihin, 15 % silttimoreeneihin ja 10 % soramoreeneihin (GTK 2005).

Taulukko 1. Geotekninen maalajiluokitus ja maalajit (mukaillen Korhonen et al. 1974).

<i>Maalajiryhmä</i>	<i>Maalaji</i>	<i>Lyhennys</i>	<i>Lajitepitoisuus, paino-%</i>			<i>Raekoko d50, mm</i>
			<i>Savi</i>	<i>Hienoaines</i>	<i>Sora</i>	
<i>Moreenimaalajit</i>	Silttimoreeni	SiMr	-	≥50	≥5	≤0,06
	Hiekkamoreeni	HkMr	-	5...50	5...50	>0,06...2
	Soramoreeni	SrMr				>2



Kuva 1. Tyypilliset siltti-, hiekka- ja soramoreenin rakeisuuskäyrät, jossa x-akselilla raekoko (mm) ja y-akselilla raekokoa vastaava seulan läpäisyprosentti (%) (mukaillen Jääskeläinen 2014).

Tarvittaessa moreenimaalajeja voidaan kuvata lisänimillä silttinen, hiekkainen tai sorainen, mikäli kyseistä lajitepitoisuutta esiintyy moreenissa tasan tai yli 30 %. Taulukon 2 mukaisesti moreeni voi saada vain yhden lisänimikkeen, joka tehdään hienorakeisemman lajitteen perusteella. Moreenin kivisyys ja lohkareisuus on raportoitava aina erikseen. Kivisyydellä tarkoitetaan 60–600 mm kokoisten kivien määrää maa-aineksessa sekä lohkareisuudella yli 600 mm kokoisten lohkareiden määrää. Kivisyyden ja lohkareisuuden nimeämiseen liittyvät pitoisuudet ovat esitetty taulukossa 3. (Korhonen et al. 1974)

Taulukko 2. Moreenimaalajien kuvaus lajitepitoisuuden perusteella (mukaillen Korhonen et al. 1974).

Nimitys	Lyhennys	Selitys
Hiekkainen silttimoreeni	hkSiMr	Silttimoreenin hiekkapitoisuus ≥ 30
Silttinen hiekkamoreeni	siHkMr	Hiekkamoreenin silttipitoisuus ≥ 30
Sorainen hiekkamoreeni	srHkMr	Hiekkamoreenin sorapitoisuus ≥ 30
Hiekkainen soramoreeni	hkSrMr	Soramoreenin hiekkapitoisuus ≥ 30

Taulukko 3. Hyvin karkean maa-aineksen GEO-luokitus (mukaillen SGY 2012).

<i>Lajite</i>	<i>Nimitys</i>	<i>Paino-%</i>
<i>Lohkareisuus</i>	Lohkareeton	≤10
	Lohkareinen	>10...30
	Runsaslohkareinen	>30
<i>Kivisyys</i>	Kivetön	≤10
	Kivinen	>10...30
	Runsaskivinen	>30

Maa-aineksen raekokosuhteella on merkitystä, mikäli halutaan painottaa kuinka suhteistunutta, seka- tai tasarakeista maa-aines on. Kuvaus tapahtuu rakeisuuden määrittämisestä raekokosuhteen d_{60}/d_{10} perusteella, missä d_{10} on raekoko läpäisyprosentin 10 ja d_{60} on raekoko läpäisyprosentin 60 kohdalla. Raekokosuhteet on esitetty taulukossa 4. Moreenia kutsutaan osittain lajittuneeksi, mikä siinä esiintyy jotakin lajitetta selvästi runsaammin kuin muita. (Korhonen et al. 1974)

Taulukko 4. Raekokosuhte (mukaillen Korhonen et al. 1974).

<i>Nimitys</i>	<i>Raekokosuhte</i> $C_u = d_{60}/d_{10}$
<i>Tasarakeinen</i>	< 5
<i>Sekarakeinen</i>	> 5...15
<i>Suhteistunut</i>	> 15

Maa-aineksen sisältämiä rakeita kuvataan niiden muodon ja pöyristyneisyyden avulla yhteensä kuudella eri termillä. Muotoa kuvaavat termit ovat litteä, pitkulainen ja kulmikas sekä pyöristyneisyyttä kuvaavat nimitykset ovat pyöreäsärmäinen, särmikäs tai pyöristynyt. (Korhonen et al. 1974)

Geotekninen luokituksen mukaan maakerros on routivaa, jos sen huokosiin tulevan tai olevan veden jäätyminen aiheuttaa maakerroksen tilavuuden kasvua. Luokitus jakaa maalajit routimattomiin ja routiviin. Luokituksen mukaan silttimoreenit ovat routivia sekä hiekka- ja sora-moreenin yleensä routivia. Hiekka- ja sora-moreenin routimattomuus on tarvittaessa tarkistettava, mikäli ne sisältävät hienoainesta vain hyvin vähän. (Korhonen et al. 1974)

2.3 Moreenin vedenläpäisevyys ja siihen vaikuttavat tekijät

Maaperässä vesi liikkuu huokostilan muodostamissa käytävissä (Jääskeläinen 2014). Eri maalajien välillä vedenläpäisevyyden vaihtelut voivat olla erittäin suuria. Esimerkiksi soralla ja savella vedenläpäisevyyden ero voi olla jopa 100 000 000-kertainen. (Rantamäki et al. 1979) Tyypillisiä vedenläpäisevyyksiä eri maalajeille ovat: sora $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$, hiekka $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-7}$, siltti $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$ ja savi $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-11}$ m/s. Hiekan tapaan, moreenien vedenläpäisevyys on hyvin riippuvainen sen koostumuksesta. Tyypillisiä vedenläpäisevyyksiä erilaisille moreeneille ovat: soramoreeni $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$, hiekkamoreeni $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}$ ja silttimoreeni $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. (Airaksinen 1978) Euroopan komission vertailuasiakirja kaivannaisjätteiden hallinnan parhaista käyttökelpoisista tekniikoista määrittelee vedenläpäisevyyden arvot viiteen luokkaan. Nämä luokat ja niitä vastaavat vedenläpäisevyyden arvot ovat: hyvin suuri vedenläpäisevyys ($k > 1 \cdot 10^{-2}$ m/s), suuri vedenläpäisevyys ($1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ m/s), vettä läpäisevä ($1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$ m/s), huonosti vettä läpäisevä ($1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-6}$ m/s) ja hyvin huonosti vettä läpäisevä tai läpäisemätön ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s). (Garbarino et al. 2018)

Tunnetuin pohjaveden virtauksen perusyhtälö noudattaa Darcyn lakia. Lain mukaan hiekkapilarin lävitse kulkema virtaama on kääntäen verrannollinen hiekkakerroksen paksuuteen ja suoraan verrannollinen sekä kerroksen poikkipinta-alaan että vedenpaineen korkeuseroon kerroksen ylä- ja alapäässä. (Airaksinen 1978) Darcyn laki ja yhtälö on esitetty kaavassa 1. Laki olettaa, että maassa oleva virtaus on pyörteetöntä eli laminaarista (Rantamäki et al. 1979).

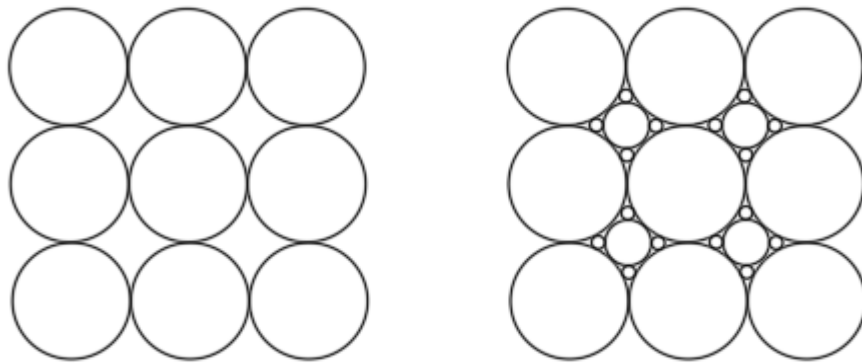
$$Q = A \cdot v = A \cdot k \cdot i = A \cdot k \cdot \frac{H}{L} \quad (1)$$

missä Q on virtaama (m^3/s), A on poikkipinta-ala (m^2), v on virtausnopeus (m/s) k on vedenläpäisevyys (m/s), i on hydraulinen gradientti (H/L), H on paine-ero virtausmatkan päiden välillä (m) ja L on virtausmatka (m) (Rantamäki et al. 1979).

Maalajin vedenläpäisevyyden arviointi keskimääräisen raekoon avulla (d_{50}) on hyvin epätarkkaa varsinkin moreeneille. Yleisesti on todettu, että vedenläpäisevyyteen vaikuttaa enemmän pienemmät raekoot, kuten hieno- ja saviaineksen määrät. (Jääskeläinen 2014) Koska vesi liikkuu maan huokosia pitkin, on hieno- ja saviaineksella

kyky täyttää isompien rakeiden välit, minimoiden vedenkulkeutumiselle jäävän tyhjän tilan. Toisin sanoen materiaali on siis tiiviimpää. (Rantamäki et al. 1979)

Hienomman aineksen määrä ei kerro kaikkea maalajin vedenläpäisevyydestä, vaan myös rakeisuuskäyrän muodolla, ja siten raekokosuhteella on merkitystä. Vaikka hienoainesta olisi paljon, tasarakeisella maalla tai epäjatkuvalle rakeisuuskäyrällä rakeiden väliin voi jäädä paljon tyhjää tilaa, kun taas sekarakeisessa maassa nämä välit täyttyvät ja huokostilaa jää vain vähän (Kuva 2). Sekarakeisuuden lisäksi, vedenläpäisevyyteen vaikuttaa rakeiden muoto, eli miten lähekkäin ne pystyvät toisiinsa suhteen asettua. (Kalliainen et al. 2011)



Kuva 2. Kuvassa tasarakeinen maa-aines vasemmalla ja sekarakeinen oikealla. Tasarakeisessa maassa vesi pääsee liikkumaan helpommin huokostilassa. (mukaillen Kalliainen et al. 2011)

Myös huokostilan muodostumisella on merkitystä maalajin vedenläpäisevyyden kannalta, koska vain tehokkaiden huokosten kautta vedenvirtaaminen on mahdollista. Tehokkaiksi huokosiksi luokitellaan ne raot, halkeamat ja huokokset, jotka ovat yhteydessä toisiinsa. Huokosia voi muodostua myös tehottomiksi, kuten taskuiksi ja umpiperähuokosiksi, joissa vesi on yleensä lähes seisovaa. (Airaksinen 1978) Materiaalin huokostila voidaan laskea esimerkiksi yleisesti raekokosuhteen (Kaava 2) tai materiaalin kuivatilavuuspainon avulla (Kaava 3).

$$n = 0,255 * (1 + 0,83^{C_u}) \quad (2)$$

missä n on huokoisuus (%) ja C_u on raekokosuhde (d_{60}/d_{10}) (Blohm 2016).

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad (3)$$

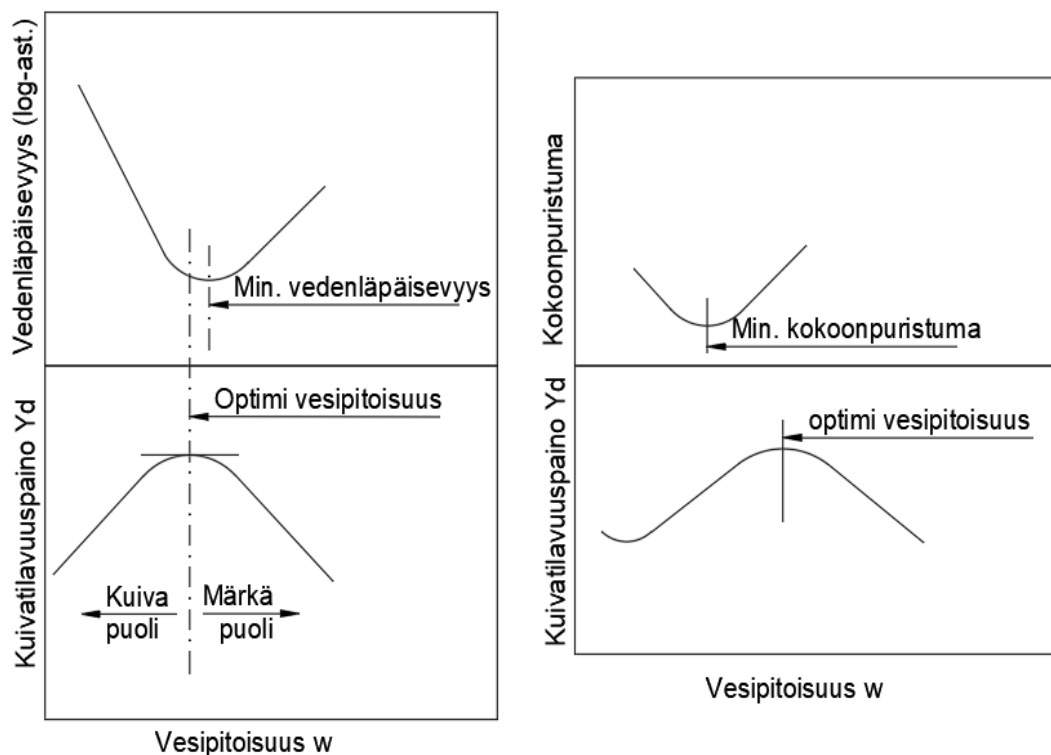
missä n on huokoisuus (%), γ_d on kuivatilavuuspaino (kN/m^3) ja γ_s on kiviainesten tilavuuspaino $26,5$ (kN/m^3) (Jääskeläinen 2014).

Maaperässä liikkuvalla vedellä ja sen määrällä eli toisin sanoen maan vesipitoisuudella ja kyllästysasteella on vaikutusta vedenläpäisevyyteen. Kun maa kuivaa, kuivavat maaperässä olevat huokokset suurimmista alkaen, mikä pienentää vedenläpäisevyyttä. Vedenläpäisevyys pienenee, koska vain maaperän pienimmät huokokset ovat vettä johtavia. Täysin saturoituneessa maassa huokokset ovat jo veden kyllästämiä ja voivat toimia veden virtauskanavina, minkä takia vedenläpäisevyys on suurimmillaan. (Hillel 2004) Moreenien vesipitoisuus vaihtelee sen koostumuksen ja olosuhteiden mukaan (Rantamäki et al. 1979). Vesipitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat alueen topografia, pohjaveden korkeus, pintavesiolosuhteet sekä moreenin lajitepitoisuus ja raekokosuhde (RIL 1985). Tyypillisesti luonnontilassa olevat hiekka- ja sora-moreenit ovat vesipitoisuudeltaan noin 5–15 % luokkaa. Silttimoreeneja voi esiintyä kosteampana niiden vesipitoisuuden ollessa noin 15–25 %. (Rantamäki et al. 1979) Veden määrän lisäksi vedenläpäisevyyteen vaikuttaa sen laatu, kuten tiheys ja viskositeetti. Veden tiheys ja viskositeetti ovat riippuvaisia lämpötilasta sekä veteen liuenneista aineista. Vedenläpäisevyys on sitä pienempi mitä viskoosimpaa, eli viileämpää vesi on. (Hillel 2004)

Vesipitoisuudella on merkitystä materiaalin tiivistettävyyden kannalta. Materiaalin tiiveydellä on taas huomattava vaikutus vedenläpäisevyyttä pienentävänä tekijä sekä sen lujuusominaisuuksien kannalta. Jääkauden seurauksesta moreenit ovat yleensä luonnontilaisena hyvin tiiviisti pakkautuneena. (Rantamäki et al. 1979) Maanrakentamisessa moreeni joudutaan yleensä kaivamaan, kuljettamaan ja läjittämään (Korhonen & Gardemeister 1971). Tämän seurauksena moreenin tiiveys löyhtyy ja se joudutaan uudelleen tiivistämään. Tiivistystyön laatuun maastossa vaikuttavat käytettävissä oleva tiivistyskalusto ja vesipitoisuus. Teoreettiseen 100 % tiiveysasteen on mahdollista päästä materiaalin maksimikuivatilavuuspainossa, mikä voidaan saavuttaa

vain optimivesipitoisuudessa. Tämän takia maanrakentamisessa tiivistystyö yritetään yleensä tehdä lähellä maalajin optimivesipitoisuutta. (RIL 1995) Liiallinen vesipitoisuus aiheuttaa moreeneilla maan häiriintymistä, jolloin moreenia ei voi enää tiivistää. Riippuen moreenin koostumuksesta, jopa 2 % optimivesipitoisuuden ylitys voi johtaa moreenin kantavuuden menettämiseen lähes kokonaan. (Tielaitos 1993) Liiallinen vesipitoisuus voi aiheuttaa osaltaan materiaalin halkeilua, kun vesi poistuu rakenteesta tiivistettäessä. Halkeilu voi johtaa vedenläpäisevyyden kasvuun usealla kertaluokalla. (Suomen ympäristökeskus 2002)

Vaikka maaperän tiivein tila on saavutettavissa vain optimivesipitoisuudessa, ei vedenläpäisevyys ole kuitenkaan aina tiivistyksen jälkeen pienimmillään. Tiivistämisessä käytettävä vesipitoisuus saattaa poiketa optimivesipitoisuudesta, mikäli maksimikuivatilavuuspaino ei ole materiaalilta tärkein vaadittava ominaisuus. Kuvassa 3 on esitetty savelle kaksi kuvaajaa, joissa vasemmalla esitellään saven vedenläpäisevyyssominaisuuksien vaihtelu vesipitoisuuden muuttuessa ja oikealla saven kokoonpuristuvuusominaisuuksien vaihtelu vesipitoisuuden muuttuessa. (RIL 1995) Tämä vaikutus korostuu erityisesti savisilla ja runsaasti hienoainesta sisältävillä mailla sekä siihen on törmätty esimerkiksi savimoreeneilla, joita on käytetty mineraalisina tiivisterakenteina. Ilmiön taustalla on ylimääräisen veden vaikutus materiaalin tiivistettävyyteen. Kun näytettä on tiivistetty hieman optimivesipitoisuuden märemmällä puolella, on huomattu, että materiaalin sisältämät rakeiden muodostamat paakut ovat hajonneet ja lopputulos on ollut tasaisemmin jakautunut, homogeenisempi ja plastisempi näyte. Liian matalassa vesipitoisuudessa tiivistetyssä näytteessä, taas on huomattu, että tiivistystyö ei välttämättä ole riittänyt kovien paakkujen hajottamiseen, mikä voi johtaa virtauskanavien muodostumiseen ja vedenläpäisevyyden kasvuun. (Hong 2008; Saadel & Froc 2016)



Kuva 3. Saven vedenläpäisevyyden sekä kokoonpuristuvuuden vaihtelevuus vesipitoisuuden muuttuessa. Vasemmalla saven vedenläpäisevyyssominaisuuksien vaihtelu vesipitoisuuden muuttuessa ja oikealla saven kokoonpuristuvuusominaisuuksien vaihtelu vesipitoisuuden muuttuessa. (mukaillen RIL 1995)

Vedenläpäisevyyteen voi ajan mittaan vaikuttaa maaperän eroosio. Moreenit eivät yleensä ole kovin eroosioherkkiä, mutta niissäkin sitä esiintyy. Erityisen altistavia tekijöitä moreenin eroosiolla ovat esimerkiksi jyrkät rinteet sekä löyhästi pakkautuneiden hiekka- ja silttimoreenien huuhtoutuminen. (RIL 1985) Yksi vaarallisimmista eroosiotyypeistä padoille on sisäinen eroosio eli piping-ilmiö. Tässä eroosiomuodossa vesi tempaisee mukaansa hienoainesta ja muodostaa virtauskanavia, kasvattaen vedenläpäisevyyttä entisestään. (Isomäki et al. 2018)

Moreenit ovat yleensä routimiselle alttiita niiden hienoainespitoisuuden takia, mikä altistaa moreenin kapillaariselle veden nousulle (RIL 1985). Tyypillisesti yli 15 % hienoainesta sisältävät moreenit saattavat olla routivia ja 35 % hienoainesta sisältävät moreenit ovat varmasti routivia (Korkiala-Tanttu et al. 2008). Aikaisemmassa

tutkimuksessa on selvinnyt, että padoissa routiminen voi yltää usean metrin syvyyteen padon moreeniseen tiivistesydämeen (Silva 2019). Kausittainen jäätyminen ja sulaminen voi aiheuttaa joissakin maalajeissa huomattavaa eroosiota, joka voi johtaa vedenläpäisevyyden kasvamiseen. Aikaisemmassa tutkimuksessa on selvinnyt, että tiiviillä siltimoreeneilla ei usean jäätymis-sulamis-syklin jälkeen havaittu juurikaan muutosta vedenläpäisevyyteen. Löyhästi pakkaantuneilla siltimoreeneilla taas, jäätymis-sulamis-syklit saattavat kasvattaa vedenläpäisevyyttä moninkertaisesti. (Viklander 1998) Karkearakeisilla maalajeilla on huomattu olevan itsekorjaantuvuusominaisuuksia jäätyminen ja sulamisen aiheuttamaa eroosiota vastaan, mikä johtuu koheesiovoimien puutteesta maa-aineksen sisällä. (Jantzer 2009)

Jäätyminen ja sulamisen lisäksi, eroosiota rakenteessa voi aiheuttaa myös vettyminen ja kuivuminen. Nämä molemmat eroosiota aiheuttavat tekijät ovat standardissa SFS-EN 13361:2018 geosynteettisiltä eristeiltä vaadittuja tarkkailtavia ominaisuuksia, joita käytetään pato- ja allasrakentamisessa. (SFS-EN 13361:2018) Maalajin vettyminen ja kuivuminen voi aiheuttaa maa-aineksen paisumista ja kutistumista. Ilmiö korostuu erityisesti maalajeilla, joilla on runsas saviosuus. Tutkimuksessa on ilmennyt, että moreeneissa paisumista ei yleensä huomattavasti tapahdu. (Izdebska-mucha & Wójcik 2014) Maalajin kostuessa sen saviosuus paisuu muodostaen monimutkaisempia virtausreittejä, mikä laskee maalajin vedenläpäisevyyttä. Saven määrän lisäksi vedenläpäisevyyteen vaikuttaa se, mitä savimineraaleja maalaji sisältää. (Schuhmann et al. 2011) Kuivumisen seurauksena saven maa-aines voi paakkuuntua ja synnyttää siten helposti halkeamia ja virtauskanavia. Tämä halkeilu voi moninkertaistaa maa-ainekselle ominaisen vedenläpäisevyyden. (Rayhani et al. 2007) Saviaineksen kuivuessa liikaa, esimerkiksi uunikuivatuksessa, voi siinä ilmetä sementoivaa vaikutusta. Tällöin saven ominaisuudet saattavat muuttua täysin, eikä se ne enää palaudu ennalleen, vaikka savea kostutettaisiin uudestaan. (SFS-EN 1997-2:2007 + AC:2010) Saven uunikuivatusta lukuun ottamatta, maalajeilla on huomattu olevan itsekorjautuvuusominaisuuksia kuivumisen aiheuttamaa eroosiota vastaan. Kuivumisen aiheuttamat halkeamat voivat yhdistyä taas plastisemmaksi kokonaisuudeksi, jos maa-aineksen kyllästymisaika on riittävän pitkä. (Rayhani et al. 2007)

2.3.1 Tutkimusmenetelmien vaikutus vedenläpäisevyyteen

Maalajin vedenläpäisevyyteen voi epäsuorasti vaikuttaa tutkimusmenetelmä, jolla sen vedenläpäisevyyttä tarkastellaan. Perinteisesti maastossa mitatut tulokset voivat olla huomattavasti suurempia kuin laboratoriossa samalla maa-aineksella tehdyt tutkimukset. Syynä tälle on maastossa esiintyvät maaperän ja rakenteiden epähomogeenisuus, joka jää laboratoriossa huomioimatta. Syitä epähomogeenisuudella voi olla esimerkiksi maaperän kivisyys, lohkaraisuus, rakeisuuden ja tilavuuspainon vaihtelut sekä pieneliöstön ja juurien aiheuttamat käytävät. Tiivisterakenteissa vaihtelua aiheuttaa lähinnä tiiveysasteen vaihtelu kerrosten välillä. Tämän lisäksi ympäristöolosuhteilla, kuten lämpötilalla ja sateella on vaikutusta lopulliseen mitattuun vedenläpäisevyyteen. Menetelmän valintaan vaikuttaa tehdäänkö mittaukset pohjaveden yläpuolella vai alapuolella. Väärän tutkimusmenetelmän valinta voi aiheuttaa liian pieniä tai suuria vedenläpäisevyyksiä. (Suomen ympäristökeskus 1995)

Laboratoriotutkimuksien vedenläpäisevyyteen vaikuttavat tekijät lähtevät jo kenttäolosuhteista. Näitä tekijöitä ovat ympäristöolosuhteet näytteenottohetkellä (esimerkiksi sade ja lämpötila) sekä näytteille määritellyt laatu- ja näytteenottoluokat. Luokitukset on määritelty esimerkiksi eurooppalaisessa standardissa SFS-EN ISO 22475-1. Laatuluokaltaan huonossa näytteessä sen ominaisuudet, kuten esimerkiksi rakeisuus voivat muuttua ennen laboratoriokokeita, vaikuttaen maa-aineksen todelliseen vedenläpäisevyyteen. (Liikenneviraston ohjeita 2015) Kuten kenttäolosuhteissa, laboratoriossakin on tärkeää oikeanlaisen tutkimusmenetelmän valinta. Valintaan voidaan käyttää aikaisempaa kokemusta vastaavan maalajin vedenläpäisevyydestä. Maalajeilla, joiden vedenläpäisevyys on suurempaa kuin $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, tyypillisesti käytetään laboratoriossa vakiopainemenetelmää kiinteäseinäisessä sellissä. Kun vedenläpäisevyys laskee maksimissaan $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, tulisi vakiopaine muuttaa muuttuvapaineiseksi sekä kokeessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota kiinteän sellin ja näytteen väliseen rajapintaan. Alle $1 \cdot 10^{-8}$ m/s vedenläpäisevyyden omaavissa näytteissä tulisi kiinteäseinäinen selli vaihtaa joustavaseinäiseen. Laboratoriokokeissa tulisi kiinnittää erityistä huomiota, että käytetty painetaso ja kyllästysaika ovat riittäviä näytteen kyllästymiseen. (Suomen ympäristökeskus 1995) Mikäli kyllästysaste tai näytteen läpäisevä virtaus ei ole hallittua, vaikuttaa se kokeen laatuluokkaan (SFS-käsikirja 179-2 2008). Tutkimusmenetelmän lisäksi vedenläpäisevyyteen voi vaikuttaa sullontatapa. Perinteisiä sullontamenetelmiä ovat proctor-sullonta ja IC-testerillä tehtävä

sullonta. IC-testerillä tehtävässä sullonnassa pitää olla varmuus, että kyseinen materiaali on soveltuva sille, eikä tulos osoitetusti eroa proctor-sullonnan tuloksesta. (Suomen ympäristökeskus 2002)

2.3.2 Rakeisuuteen perustuva vedenläpäisevyyden arviointi

Rakeisuuteen perustuvia maalajin vedenläpäisevyyden arviointia varten on kehitetty lukuisia erilaisia laskentamenetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi Breyer, Kozeny-Carman, Hazen, Slitcher, Terzaghi ja U.S Bureau of Reclamation (USBR). Useimmat erilaiset empiiriset laskentayhtälöt noudattavat samaa kaavaa, joka voidaan esittää seuraavasti: (Roy et al. 2020)

$$k = \frac{g}{v} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (4)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), C on lajittuneisuusaste, $f(n)$ on huokoisuuden funktio ja d_e on tehokas rakeiden halkaisija (mm) (Roy et al. 2020).

Lajittuneisuusaste, huokoisuuden funktio ja tehokas rakeiden halkaisija ovat riippuvaisia raekokoanalyysissä käytetystä menetelmästä. Kinemaattinen viskositeetti voidaan laskea dynaamisen viskositeetin ja nesteen tiheyden avulla seuraavasti: (Roy et al. 2020).

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), μ on dynaaminen viskositeetti ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) ja ρ on nesteen tiheys (Kg/m^3) (Roy et al. 2020).

Breyerin yhtälö ei huomioi ollenkaan huokoisuutta ja sen käyttö soveltuu parhaimmin huonosti lajittuneille heterogeenisille maalajeille (Kaava 6). Reunaehdoiksi yhtälölle on asetettu raekokosuhte väliltä 1 ja 20 sekä tehokasraekokoa 0,06–0,6 mm. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{C_u} \cdot d_{10}^2 \quad (6)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), C_u on raekokosuhte (d_{60}/d_{10}) ja d_{10} on tehokas raekoko (mm) (Odong 2008).

Kozeny-Carmanin kaava on yksi tunnetuimmista ja hyväksytyimmistä menetelmistä vedenläpäisevyyden arviointiin rakeisuuden perusteella (Kaava 7). Yhtälö ei sovellu savimaille ja siinä tehokasraekoko saa olla enintään 3 mm. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \cdot d_{10}^2 \quad (7)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), n on huokoisuus ja d_{10} on tehokas raekoko (mm) (Carrier 2003).

Hazenin menetelmä on esitetty kaavassa 8. Menetelmä kehitettiin tasarakeiselle hiekalle, mutta sitä voidaan käyttää myös soraisille maalajeille, mikäli yhtälön reunaehdot täyttyvät. Hazenin yhtälössä raekokosuhteen pitäisi olla pienempi kuin 5 ja tehokasraekoko tulisi olla väliltä 0,1–0,5 mm. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 10 \cdot (n - 0.26)) \cdot d_{10}^2 \quad (8)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), n on huokoisuus ja d_{10} on tehokas raekoko (mm) (Hazen 1892).

Slitcherin yhtälö on esitetty kaavassa 9. Yhtälön ainoaksi reunaehdoksi on esitetty, että tehokasraekoko on oltava väliltä 0,01–0,5 mm. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \quad (9)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), n on huokoisuus ja d_{10} on tehokas raekoko (mm) (Slichter 1905).

Terzaghin yhtälö soveltuu parhaiten suurirakeisille hiekkamaille (kaava 10). Yhtälö käyttää lajittuneisuusastetta (C) joka voi olla väliltä $6,1 \cdot 10^{-3}$ – $10,7 \cdot 10^{-3}$. Yleensä käytetään välin keskiarvoa eli 0,0084. Yhtälölle ei ole asetettu varsinaisia reunaehtoja maalajisuositusta lukuun ottamatta. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot C \cdot \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 \cdot d_{10}^2 \quad (10)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), C on lajittuneisuusaste, n on huokoisuus ja d_{10} on tehokas raekoko (mm) (Odong 2008).

U.S. Bureau of Reclamationin (USBR) yhtälö ei Breyerin menetelmän tapaan ole riippuvainen maalajin huokoisuudesta (kaava 11). Yhtälö käyttää tehokkaan raekoon (d_{10}) sijasta 20 % läpäisyä vastaavaa raekokoa d_{20} . Yhtälön on katsottu olevan soveltuvien keskirakeisille hiekkamaille. Reunaehdoksi yhtälölle on asetettu, että sen raekokosuhteen tulisi olla pienempi kuin 5. (Odong 2008)

$$k = \frac{g}{v} \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot d_{20}^{0,3} \cdot d_{20}^2 \quad (11)$$

missä k on vedenläpäisevyys (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), v on kinemaattinen viskositeetti (m^2/s), n on huokoisuus ja d_{20} on 20 läpäisyprosenttia vastaava raekoko (mm) (Odong 2008).

Laskentamenetelmien tarkkuutta on tarkasteltu lukuisille eri maalajeille eri tutkimuksissa (Odong 2008; Blohm 2016; Cabalar & Akbulut 2016; Roy et al. 2020). Parhaaksi katsottu menetelmä näissä tutkimuksissa on ollut hyvin vaihtelevaa ja tulokset ovat olleet osittain ristiriitaisia. Tutkimuksissa on huomattu, että laskentamenetelmillä on saatu tarkkoja tuloksia riippumatta menetelmille asetetuista reunaehdoista.

3 MOREENI MINERAALISENA TIIVISRAKENTEENA

Moreenia käytetään kaivoksilla ympäristönsuojelurakenteiden rakennusmateriaaleina monissa rakenteissa. Moreeni toimii rakenteissa yleensä mineraalisena tiivistyskerroksena. Tiivistysosa voi olla esimerkiksi luonnonmaista muokattua pohjarakennetta, rakennettua padon tiivistyssydäntä tai kaivannaisjätealueen peiterakennetta. (Suomen ympäristökeskus 2002) Tiivisterakenteissa vedenläpäisevyyden tavoitellaan olevan mahdollisimman pieni, johon hienoaainesmoreenit yleensä soveltuvat hyvin. Ympäristönsuojelurakenteissa vedenläpäisevyys on hyvin tärkeä tekijä tuntea. Esimerkiksi pohjarakenteissa huonosti vettä johtava materiaali vähentää veden kulkeutumista ja estää näin haitta-aineiden leviämistä ympäristöön. (SGY 2008) Padon tiivisterakenteessa pieni vedenläpäisevyys vähentää suotautuvan veden määrää ja helpottaa suotovesien keräilyä. Vesipinnan tasainen lasku patorakenteen läpi pitää rakenteen sisäiset paineolosuhteet tasaisina ja pienentää stabiliteettiongelmien riskiä. (Isomäki et al. 2018) Pinta-, peite-, ja sulkurakenteissa, huonosti vettä läpäisevä materiaali hidastaa sadevesien imeytymistä suojattavaan haitalliseen aineeseen sekä edistää rakenteen pintavaluntaa (Suomen ympäristökeskus 2008).

3.1 Rakentamista ohjaavat säädökset

Suomen kaivannaisteollisuuden pato- ja allasrakentamisen osalta ei ole yhtenäistä yleispätevää ohjetta käytössä. Sen sijaan kaivannaisteollisuudessa sovelletaan lukuisia sekä kansallisia, että kansainvälisiä lainsäädäntöjä, asetuksia, standardeja, oppaita ja muita ohjeita. Kaatopaikkojen rakentamista Suomessa ohjaa direktiiviin (1999/31/EY) perustuva valtioneuvoston asetus (331/2013). (Tuomela 2016) Patojen rakentamista Suomessa ohjaavat valtioneuvoston asetus patoturvallisuudesta (319/2010) ja patoturvallisuuslaki (494/2009) (Isomäki et al. 2012). Muita sovellettavia lakeihin ja asetuksiin perustuvia tai muita oppaita ja ohjeita tarjoavat esimerkiksi Euroopan komission vertailuasiakirja (MWEI BREF) kaivannaisjätteiden hallinnan parhaista käyttökelpoisista tekniikoista (BAT), Hämeen ELY-keskuksen julkaisema patoturvallisuusopas, Suomen ympäristökeskuksen oppaat kaatopaikan tiivistysrakenteista sekä kaatopaikkojen käytöstä poistosta ja jälkihoidosta, rakennustiedon ohjeet kuten InfraRYL, Ruotsin kaivosteollisuuden patoturvallisuusohje

GruvRIDAS ja Suomen rakennusinsinööriliiton julkaisut, kuten maapatotöiden suoritus- ja valvontaohje sekä kansainvälisen ja kansallisen suurpatojen komission ICOLD:in ja FINCOLD:in julkaisut. (Suomen ympäristökeskus 2002; Suomen ympäristökeskus 2008; GruvRIDAS 2012; Isomäki et al. 2012; Ympäristöministeriö 2020; FINCOLD 2021; Rakennustieto 2021; RIL 2021)

Euroopan komission vertailuasiakirja kaivannaisjätteiden hallinnan parhaista käyttökelpoisista tekniikoista tavoittelee ympäristölupakäytäntöjen yhtenäistämistä Euroopan unionissa sekä ympäristönsuojelun edistämistä. Oppaassa käsitellään kaivannaisjätteitä ja niiden ympäristönsuojeluvaiikutuksia, kaivannaisteollisuutta sekä kaivannaisjätteiden ja ympäristövaikutusten hallintatekniikoita ja -menetelmiä koko kaivannaisjätealueen elinkaaren läpi. Lisäksi oppaassa käydään lävitse pato- ja pohjarakenteiden parhaita käyttökelpoisia rakennusmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta elinkaaren eri vaiheissa, kuten suunnittelu-, toiminta-, sulkemis- ja jälkihoitovaiheessa. (Garbarino et al. 2018) Patoturvallisuusoppaassa esitetään maapatojen minimivaatimukset suunnittelun, rakentamisen sekä kunnossapidon ja korjaamisen osalta (Isomäki et al. 2012). Suomen ympäristökeskuksen opas tiivisterakenteista käsittelee tiivisterakenteille asetettavia teknisiä ominaisuuksia ja vaatimuksia suunnittelussa, rakentamisessa ja laadunvarmistuksessa (Suomen ympäristökeskus 2002). Opas kaatopaikkojen käytöstä poistosta ja jälkihoidosta on tarkoitettu nimensä mukaisesti ohjeeksi ja avuksi jätealueiden käytöstä poistamisen suunnitteluun ja siinä on esimerkiksi esitetty peiterakenteiden vaatimuksia (Suomen ympäristökeskus 2008). Suomen rakennusinsinööriliitto julkaisee ohjeita ja käsikirjoja alan toiminnan tarpeisiin (RIL 2021). InfraRYL antaa yhteiset ohjeet ja kuvaukset infrarakentamisen yleisille laatuvaatimuksille, kuten rakennustöille ja rakennusmateriaaleille. InfraRYL:in ohjeistukset eivät ole virallisia, mutta niiden vaatimuksia käytetään yleensä urakoitsijan ja rakennuttajan välisissä sopimuksissa. (Rakennustieto 2021) ICOLD ja FINCOLD julkaisut eivät myöskään ole virallisia, mutta niissä esitellään esimerkiksi patojen rakentamiseen, padon käyttöön, patoturvallisuuteen ja kunnossapitoon ohjaavia teoksia (FINCOLD 2021).

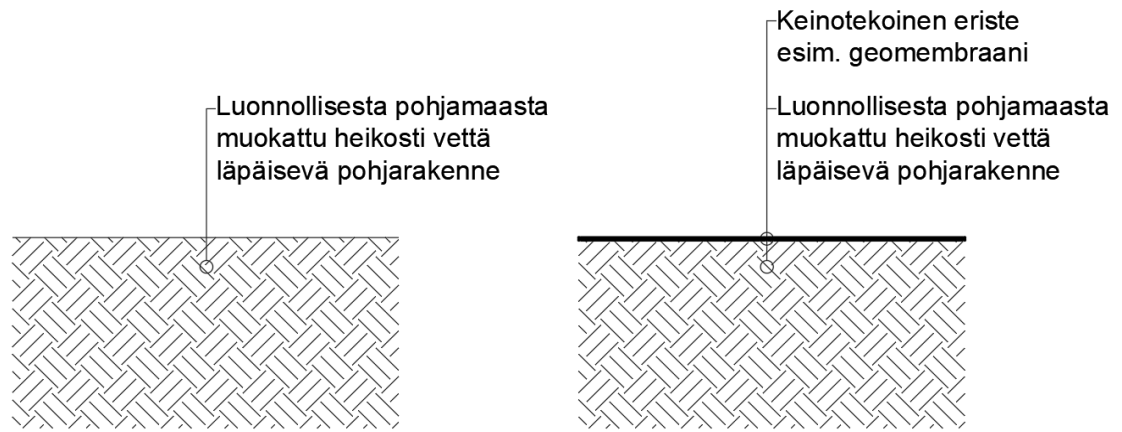
Pohjarakenteiden ja patojen suunnittelu kaivannaisjätealueella perustuu kriteereihin, jotka koostuvat esimerkiksi kaivannaisjätteen laadusta, pohjatutkimuksista, pohjakerroksen luonnollisesta vedenläpäisevyydestä, alueellisesta vesitaseesta, patorakenteiden materiaalien valinnasta ja kaivannaisjätealueen geoteknisten

ominaisuuksien tuloksista. MWEI BREF:in määrittelemät arvot eri vedenläpäisevyyksalueille esiteltiin kohdassa 2.3. Edellä mainituista kriteereistä riippuen moreenisille tiivisrakenteille sekä padoissa että pohjarakenteissa vaaditaan yleensä huonosti vettä läpäisevä arvo $1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s tai hyvin huonosti vettä läpäisevä arvo $k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. (Garbarino et al. 2018) GruvRIDAS:en kaivosteollisuuden patoturvallisuusoppaassa padon moreeniselle tiivisrakenteelle vaatimukseksi on esitetty vedenläpäisevyyden arvo $k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s (GruvRIDAS 2012).

3.2 Tyypilliset moreeniset tiivisrakenteet kaivannaisjätealueilla

Pohjarakenteilla ja fysikaalisilla esteillä pyritään ehkäisemään ja vähentämään pohjaveden ja maaperän pilaantumista koko kaivannaisjätteen sijoitusalueen elinkaaren ajan. Kaivannaisjätealueen sijainnin valinnalla voidaan vähentää pohjarakenteilta vaadittuja ominaisuuksia. Mikäli alueen pohjatutkimuksissa todetaan, että maa- ja kallioperä ovat luonnostaan tiiviitä ja vettä heikosti läpäiseviä, voivat ne riittää sellaisenaan pohjarakenteiksi. Yleensä maaperien luonnontilaiset hydrogeologiset olosuhteet eivät ole sellaisenaan tarpeeksi suotuisia, jolloin ympäristön ja pohjavesien suojelemiseksi on rakennettava tiivis vettä hyvin huonosti läpäisevä pohjarakenne. Pohjarakenteet voivat vaihdella monimutkaisista monikerroksista pohjarakenteista, edellä mainittuun yksinkertaiseen luonnonmaapohjasta muokattuun yksikerrosrakenteeseen. Yhdistelmäpohjarakenteissa käytetään yleensä keinotekoisia geosyntetisiä eristeitä sekä tarpeen mukaan myös eristekerroksia ja vuotojen havainnointijärjestelmiä. Kokonaisuudessaan pohjarakenteen paksuus voi olla yli metrin paksuinen (Ympäristöministeriö 2020). Kuvassa 4 on esitetty tekniikat luonnollisesta pohjamaasta muokatulle pohjarakenteelle (vasen) ja perinteiselle yhdistelmä rakenne ratkaisulle (oikea) (Tuomela 2016).

Yleensä luonnonmaapohjaisen tiivisrakenteen paksuus on vähintään 0,3–0,5 m, mutta tarvittavaan minimipaksuuteen vaikuttaa kaivannaisjätteen laatu ja pohjatutkimuksien tulokset. Kerrospaksuutta kasvatettaessa puolesta metristä ylöspäin, pohjarakenteen vedenläpäisevyys ei enää vähene samassa suhteessa. Tyypillisesti luonnonmaasta muokatun pohjarakenteen tulee sisältää vähintään 30 % hienoaainesta ja siinä saa olla enintään 50 % painostaan soraa. Soveltumattomille maa-aineksille, kuten humuspitoisille maille pitää tehdä massanvaihto. (Ympäristöministeriö 2020).



Kuva 4. Vasemmalla yksikerrospohjarakenne luonnonmaasta ja oikealla yhdistelmäpohjarakenne luonnonmaasta sekä keinotekoisesta eristeestä (mukaillen Tuomela 2016).

Geosynteettisiä materiaaleja ja erilaisia kuivatusjärjestelmiä hyödynnetään, kun kohteen pohjamaan luonnolliset ominaisuudet ovat yksinään riittämättömiä riittävän pienen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi. Keinotekoiset tiivisteet asennetaan yleensä allasalueen pohjan lisäksi, allasta ympäröivien patojen luiskia pitkin niiden päälle tai patojen alle. Näillä tekniikoilla voidaan saavuttaa hyvin alhaisia vedenläpäisevyyksiä ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s). (Ympäristöministeriö 2020) Geosynteettisiä tuotteita on hyvin paljon erilaisia, ja niiden ominaisuudet riippuvat käyttökohteesta ja valittavasta materiaalista (Tuomela 2016). Geosynteettisiä eristettä ovat esimerkiksi bentoniittimatto sekä geomembraanit, kuten bitumigeomembraani, HDPE-, LLDPE-, PP- ja PVC-kalvot. Pohjarakenteissa käytettävät geosynteettiset eristeet joutuvat äärimmäisten rasituksien vaikutuksen alaiseksi, joita niiden on kestävä vielä pitkälle altaan sulkemisen jälkeen. Näiden tuotteiden valmistajat takaavat materiaaleille ominaisuuksia, mutta tarvittaessa niiden kestävyys voidaan testata erilaisilla standardeista löytyvillä menetelmillä (ISO-, ASTM- ja GRI-standardit). (Ympäristöministeriö 2020) Jokaisella tuotteella ja materiaalivalinnalla on sekä hyviä puolia että rajoituksia. Näitä ovat esimerkiksi UV- ja kemiallinen kestävyys sekä rakennettavuus. (Tuomela 2016)

Kalvorakenteen ehjänä pysyminen on pohjarakenteen pitkäkestoisen toimivuuden ratkaiseva tekijä (Ympäristöministeriö 2020). Käytännössä kalvoihin tiedetään tulevan vaurioita ja korjaaminen läjityksen alettua on hyvin hankalaa. Luonnonmaasta muokattua

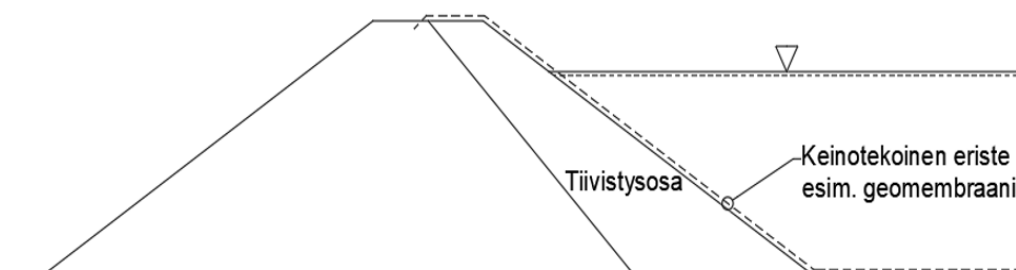
maa-ainesta, kuten hienoaainemoreenia käytetään tiivistekalvojen kanssa yhdistelmärakenteena varmistamaan rakenteen toimintaa myös tilanteissa, missä tiivistekalvo on vaurioitunut. (Tuomela et al. 2021) Tällä tavoin varmistutaan, etteivät pienet vuodot aiheuta suuria ympäristöpäästöjä. Pitkän ajan kuluttua läjitetty kaivannaisjäte voi tiivistyä muodostaen läpäisemättömän kerroksen, jolloin huoli rakenteen toiminnasta vähenee. Kuitenkin ennen sitä, keinotekoiset tiivistekalvot toimivat ensisijaisena ratkaisuna ympäristövaikutusten estämisessä. (Ympäristöministeriö 2020) Kalvojen käyttö asettaa vaatimukset myös sen alapuoliselle materiaalille, missä esimerkiksi ei saa olla liian isoja raekokoja, jotka voisivat kalvoa vasten painautuessaan aiheuttaa siihen muodonmuutoksia tai vaurioita (Tuomela 2016).

Parasta käyttökelpoista tekniikkaa käyttämällä estetään heikkolaatuisten patojen rakentaminen (Ympäristöministeriö 2020). Kohtuuttomien kustannuksien syntymisen ehkäisemiseksi, rakennusmateriaaleina pyritään yleensä käyttämään kaivannaisjätealueelta saatavia materiaaleja (SGY 2008). Padoissa käytettävien materiaalin kelpoisuus rakennusmateriaaleiksi tulee määrittää standardin Eurokoodi 7–2 mukaisesti tai vastaavilla kansallisilla tai kansainvälisillä standardeilla, jotka ovat yhdenmukaisia Eurokoodin kanssa. Tällöin padoissa vältetään sopimattomien materiaalien käytöstä, jonka avulla pystytään sekä vähentämään että estämään haitallisia ympäristövaikutuksia. Myös kaivannaisjätteitä voidaan hyödyntää patorakentamisessa, mutta niiden soveltuvuus on erikseen todettava laboratoriokokeilla. Käytettävien materiaalien tulee kestää esimerkiksi sisäistä ja ulkoista eroosiota, sulamisen ja jäätyminen aiheuttamaa eroosiota, kostumisen ja kuivamisen aiheuttamaa eroosiota sekä rapautumista. Mikäli rakenteessa käytetään keinotekoisia eristeitä, niitä pitkin muodostuva liukupinta täytyy ottaa huomioon padon stabiliteettia tarkastellessa. (Ympäristöministeriö 2020)

Patorakenteiden isoin ero pohjarakenteisiin on, että patomateriaalit yleensä joudutaan leikkaamaan, kuljettamaan, levittämään ja tiivistämään. Tällöin tiivisrakenteen rakentamisessa korostuu erityisesti tiivistystyö ja käytettävä materiaali. Tiivistystyön toteutuksesta on saatavilla ohjeita esimerkiksi InfraRYL:istä, missä määritellään rakentamisessa käytettävä materiaalin maksimikerrospaksuus ja jyräyskertojen määrä. Nämä ovat tyypillisimpiä tekijöitä, joilla varmistetaan, että tietty maan tiiveys saavutetaan ja laadullisiin vaatimuksiin päästään. Tiivistyksessä on huomioitava myös materiaalin maksimiraekoko, sillä tiivistystyön onnistumisen kannalta materiaali ei saa

sisältää liian isoja raekokoja. Alueelta saatava moreeni voidaan rakentamisessa jaotella esimerkiksi kolmeen osaan: suoraan rakentamiseen soveltuva moreeni, käsittelyä (seulontaa) vaativa moreeni ja käyttökelvoton moreeni. Luokitteluun vaikuttaa moreenin hienoaainespitoisuus ja yli 60 mm raekokojen osuus. (AFRY Finland Oy 2021a)

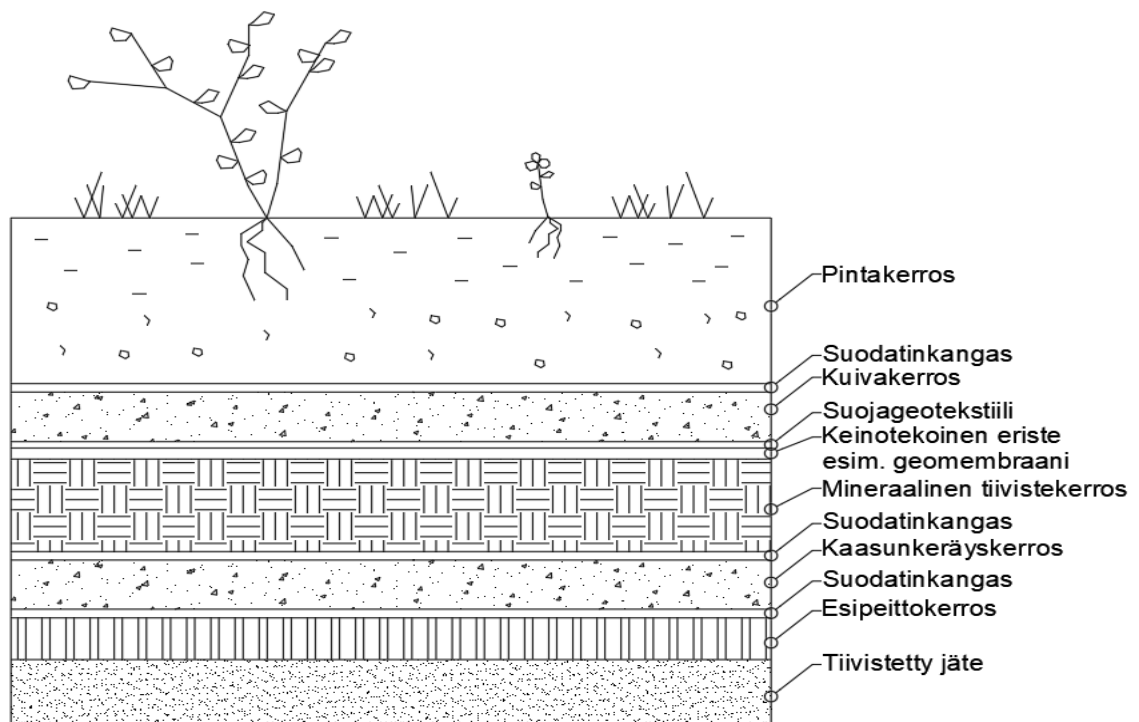
Tilanteissa, missä kaivannaisjäte koostuu sekä vedestä että kiinteästä aineesta (esimerkiksi rikastushiekka), padon rakentaminen aloitetaan alkupadolla. Useimmiten padossa on tiivistesydän, johon hienoaainesmoredi soveltuu hyvin. Tiivistesydämen lisäksi patoon on suunniteltava tarvittavat eroosiosuojaukset, kuivatus- ja suodatinkerrokset, veden keräysjärjestelmä sekä mahdollinen tukipenger, jonka varaan edellä mainitut rakennetaan. Patojen rakentamisessa täytyy huomioida myös tulevien korotusten tarve. Korotukset voidaan tehdä joko ylä- tai alavirtaan korottamalla sekä keskilinjaa muuttamalla, jolloin korotus tapahtuu tasaisesti padon molemmin puolin. Jokaisella korotustyyllillä on omat asiansa, jotka pitää ottaa huomioon rakentamisessa. (Ympäristöministeriö 2020) Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen esimerkkipoikkileikkaus padon rakenteesta ja sen tiivistysosan sijainnista. Kuvaan on lisätty tarpeen mukaan asennettava keinotekoinen eriste.



Kuva 5. Padon esimerkkipoikkileikkaus tiivistesydämen osalta, jossa tiivistysosa on märkä puolen luiskassa. Kuvaan on lisätty tarpeen mukaan asennettava keinotekoinen eriste. (mukaillen Kohonen 2015)

Kaivannaisjätealueen elinkaarin loppupuolella sulkemis- ja jälkihoitovaiheessa kaivannaisjäte peitetään peiterakenteella. Kaivannaisjätteen sijoitusalueiden peittämisessä voidaan käyttää yhtä tai useampaa tekniikkaa: Väliaikaiset peitot, kasvillisuuspeitot, vesipeitot, märkäpeitot, happea kuluttavat kuivapeitot, läpäisevät

kuivapeitot, läpäisemättömät alhaisen virtaaman kuivapeitot ja vaihteittainen kunnostus. Näillä tekniikoilla saadaan kaivannaisjätteiden sijoitusalueiden pitkä- ja lyhytaikaista vakavuutta lisättyä. Lisäksi päästöjä pintavesiin ja ilmaan sekä hajuhaittoja saadaan vähennettyä. Peiterakenteeseen tarvittavat kerrokset ja niiden paksuudet ja niissä käytetyt materiaalit riippuvat peitettävän jätteen ominaisuuksista, ja siitä mitä halutaan saavuttaa. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki peiterakenteesta ja sen kerroksista. (Ympäristöministeriö 2020) Moreenin osuus peiterakenteesta on toimia osana mineraalista tiivistekerrosta. Hienoainespitoiset moreenit soveltuvat tiivistekerrokseen hyvin, kun tavoitellaan vähäistä läpivirtaamaa. (SGY 2008)



Kuva 6. Esimerkki peiterakenteen poikkileikkauksesta ja sen osista (mukaillen Suomen ympäristökeskus 2008).

3.3 Tiivisrakentamisen laadunhallinta ja valvonta (in situ)

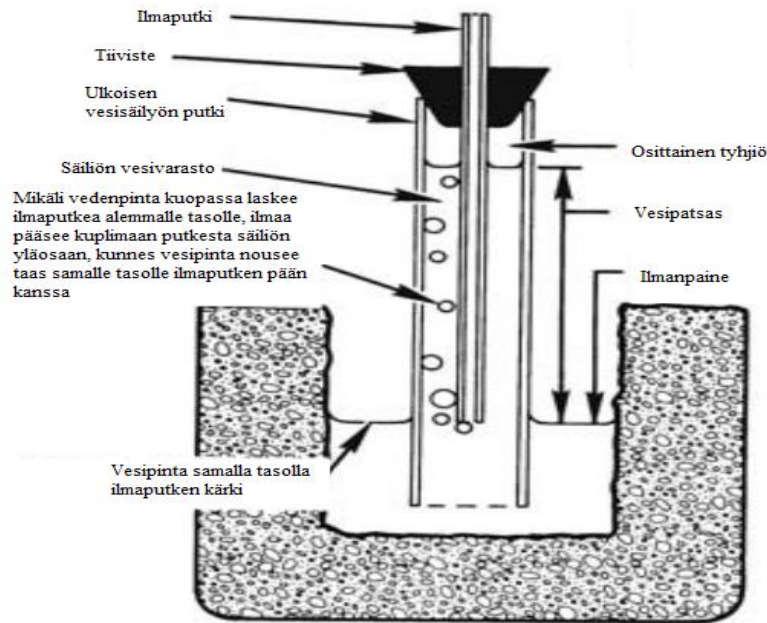
Rakenteiden vakavuuden ja toiminnan varmistamiseksi, rakentamisen aikana on toteutettava laadunvalvontaa. Laadunvarmistusta on tehtävä esimerkiksi rakennusmateriaalien, vedenläpäisevyyksien ja tiiveyden osalta. (Ympäristöministeriö 2020) Tyypillisimmissä maastossa käytettäviä vedenläpäisevyyden tutkimusmenetelmiä

rakentamisen aikana ovat esimerkiksi double ring -infiltrometri ja Guelph-permeametri (Suomen ympäristökeskus 1995; Soilmoisture 2012). Tiiveyttä mitataan maastossa esimerkiksi Troxler-mittalaitteella tai volymetrikokeilla. Troxler-laitteella pystytään myös arvioimaan maan vesipitoisuutta. (Jääskeläinen 2014)

3.3.1 Guelph-permeametri

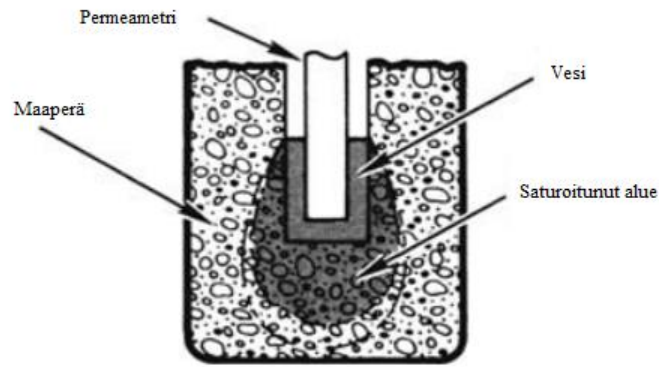
Guelph-permeametri on maalajien veden läpäisevyyden selvittämiseksi tarkoitettu vakiopainelaite kenttäolosuhteissa. Menetelmässä mitataan jatkuvaa veden purkautumista kyllästymättömään maaperään sylinterin muotoisesta kairareiästä, jossa veden pinta on koko ajan vakio. (Ronayne et al. 2012) Mittaussyvyys laitteella on maksimissaan 80 cm maanpinnan alapuolelta. Laitteella saatu vedenläpäisevyyden tulos vastaa maalajin vedenläpäisevyyttä kenttäolosuhteissa, eli siinä kosteudessa ja rakenteessa, missä maaperä sillä hetkellä on. Laitevalmistajan asettamat vedenläpäisevyyden reunaehdot laitteelle ovat $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. (Soilmoisture 2012) Eräässä tutkimuksessa on selvinnyt, että laitteella on saatu toistettavia tuloksia moreenimaaperissä jopa $1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s vedenläpäisevyyksiin asti (Macdonald et al. 2012).

Laite koostuu useasta eri osasta, mutta niistä tärkeimpiä ovat suljettu vesisäiliö sekä laitteen keskiosan läpäisevä ilmaputki (Kuva 7). Näiden avulla laitteella voidaan muodostaa tasainen vesipinta kairanreikään ja ylläpitää sitä. (Soilmoisture 2012) Menetelmää, jota laite hyödyntää kutsutaan Mariotten periaatteeksi. Vedenpinnan tasoa kairanreiässä voidaan säädellä muuntelemalla ilmaputken asentoa pystysuorassa suunnassa. Vedenpinta asettuu ilmaputken pohjan tasolle. Kun maahan imeytyy vettä ja vedenpinta vesisäiliössä laskee, muodostuu vesisäiliön yläosan ilmatilaan alipaine. Tämä alipaine voi tasoittua vain ympäristön normaalin ilmanpaineen vaikutuksesta. Vedenpinnan laskiessa ja alipaineen muodostuessa, pääsee ilmaa virtaamaan ilmaputken lävitse sen yläpäästä alapäähän laitetta ympäröivästä ilmasta. Tämä ilmavirta näkyy laitteen sisällä kuplina, jotka nousevat ilmaputken alapäästä säiliön yläosaa. Tämä tasoittaa säiliön yläosaan muodostuvaa alipainetta, joka saa veden täyttämään kairanreikää uudelleen halutulle tasolle. (Reynolds & Elrick 1986) Ilmaputken ja sen alapään geometria on erittäin tärkeää menetelmän toiminnan kannalta, jotta syntyvien ilmakuplien kokoa voidaan hallita ja näin pitää vedenpinta mahdollisimman tasaisena. Tämä minimoi vedenpinnan mahdolliset heitot ja vaihtelut, jotka voisivat muuten vaikuttaa saatuun tulokseen. (Soilmoisture 2012)



Kuva 7. Guelph-permeametrin toimintaperiaate (mukaillen Soilmoisture 2012).

Kun tasainen vedenpinta kairanreikään on saavutettu, alkaa reiän ympärille maaperään muodostua nopeasti kyllästynyt alue (Kuva 8). Kyllästyneen alueen mittasuhteet riippuvat tutkittavasta maalajista sekä kairareian halkaisijasta. Tämän alueen muoto otetaan huomioon vedenläpäisevyyttä laskiessa. Kun kyllästyneen alueen muoto on muodostunut tasaiseksi, syntyy maaperään jatkuvuustila, missä maaperää läpäisevä veden määrä pysyy vakiona. Tätä maahan imeytyvää vesimäärä voidaan mitata ajan funktiona seuraamalla laitteessa olevaa mitta-asteikkoa. Veden vakio virtaaman sekä kairanreian halkaisijan ja vesipatsaan korkeuden avulla voidaan määrittää maalajin vedenläpäisevyys kenttäolosuhteissa. (Soilmoisture 2012)



Kuva 8. Saturoitunut alue kuopassa (mukaillen Soilmoisture 2012).

Mittaaminen voidaan suorittaa käyttämällä, joko yksi- tai kaksi-painemenetelmää. Näistä yksipaine-menetelmä on epätarkempi, mutta yleensä tarpeeksi tarkka insinööritason suunnittelussa. Kaksipaine-menetelmä on tarkempi ja se on tarkoitettu tieteellisempään tarkasteluun. Vedenläpäisevyyden laskenta yksipaine-menetelmässä tapahtuu laitteen valmistajan tarjoamalla Excel-laskentapohjalla kaavan 12 mukaisesti. (Soilmoisture 2012)

$$K_{fs} = \frac{C_1 \cdot Q_1}{2 \cdot \pi \cdot H_1^2 + \pi \cdot r^2 \cdot C_1 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{H_1}{\alpha^*}\right)} \quad (12)$$

missä K_{fs} on saturoituneen tilan vedenläpäisevyys (cm/min), C_1 on muotokerroin, Q_1 yksipaine-menetelmässä käytetty tekijä, H_1 on vesipatsaan korkeus (cm), r on kairareian säde (cm) ja α^* on mikroskooppisen kapillaarisuuden pituuskerroin (cm^{-1}) (Soilmoisture 2012).

Muotokerroin C_1 ja mikroskooppisen kapillaarisuuden pituuskerroin α^* määräytyvät laskijan maaperän koostumuksen tulkinnasta. Esimerkiksi savisille tai silttisille maille, jotka voivat sisältää hiekkaa, muotokerroin lasketaan kaavan 13 avulla. Tällöin mikroskooppisen kapillaarisuuden pituuskerroin saa arvon 0,04. (Zhang et al. 1998; Soilmoisture 2012)

$$C_1 = \left(\frac{\frac{H_1}{\alpha^*}}{1.992 + 0.091 \cdot \left(\frac{H_1}{\alpha^*}\right)} \right)^{0.683} \quad (13)$$

missä C_1 on muotokerroin, H_1 on vesipatsaan korkeus (cm) ja α^* on mikroskooppisen kapillaarisuuden pituuskerroin (cm^{-1}) (Zhang et al. 1998; Soilmoisture 2012).

Käytettäessä vain sisemän säiliön virtausta mittauksen toteuttamiseen, tekijä Q_1 lasketaan kaavan 14 avulla. Kaavassa oleva vedenpinnankorkeuden muutosaste taas saadaan jakamalla vedenpinnankorkeuden muutos säiliössä senttimetreissä, siihen kuluneella ajalla minuuteissa. (Soilmoisture 2012).

$$Q_1 = R_1 \cdot 2,16 \quad (14)$$

missä Q_1 on yksipaine-menetelmässä käytetty tekijä ja R_1 on veden pinnankorkeuden muutosaste (cm/min) (Soilmoisture 2012).

Heterogeenisten maaperien vedenläpäisevyyden mittaaminen, voi johtaa negatiivisiin vedenläpäisytuloksiin kaksipaine-menetelmällä, koska laskentamenetelmä olettaa maaperän olevan homogeenistä ja sen ominaisuuksien olevan samoja (Salver & Dane 1993). Tutkimuksessa on havaittu ongelmia mitattaessa moreenimaaperää. Haasteita ovat aiheuttaneet kairareian seinien valuminen ja ilmalukon muodostuminen laitteeseen. (Mohanty 1994)

3.3.2 Hiekkavolymetrikoe

Hiekkavolymetrikoe on menetelmä maan luonnontilaisen tilavuuspainon mittaamista varten. Saadun tilavuuspainon avulla voidaan siten määrittää kohdealueen maakerroksen tiiveysaste ja käyttää sitä hyödyksi esimerkiksi maarakentamisen laaduntarkkailussa. Tilavuuspainon määrittämistä volymetrillä varten tarvitaan näytteen painovoima sekä näytteen alkuperäinen kokonaistilavuus. Koe aloitetaan kaivamalla maakerrokseen koekuoppa, josta otetaan talteen kaikki irronneet ja liikahtaneet rakeet. Talteen otettu maa-aines kuivataan ja punnitaan, josta saadaan tietoon näytteen massa sekä kosteana, että kuivana. Kosteaa näytteen massaa voidaan käyttää selvittämään maa-aineksen tilavuuspaino ja kuivan näytteen massaa kuivatilavuuspainon. Hiekkavolymetrissä näytteen tilavuus selvitetään täyttämällä koekuoppa ennestään tunnetulla tasarakeisella hiekalla. Koekuopan tilavuus eli näytteen tilavuus saadaan tietoon kuopan täyttämiseen käytetyn hiekkamäärän perusteella. Kun näytteen massa ja kokonaistilavuus on selvillä, voidaan tilavuuspaino laskea kaavalla 15. (Kalliainen et al. 2011)

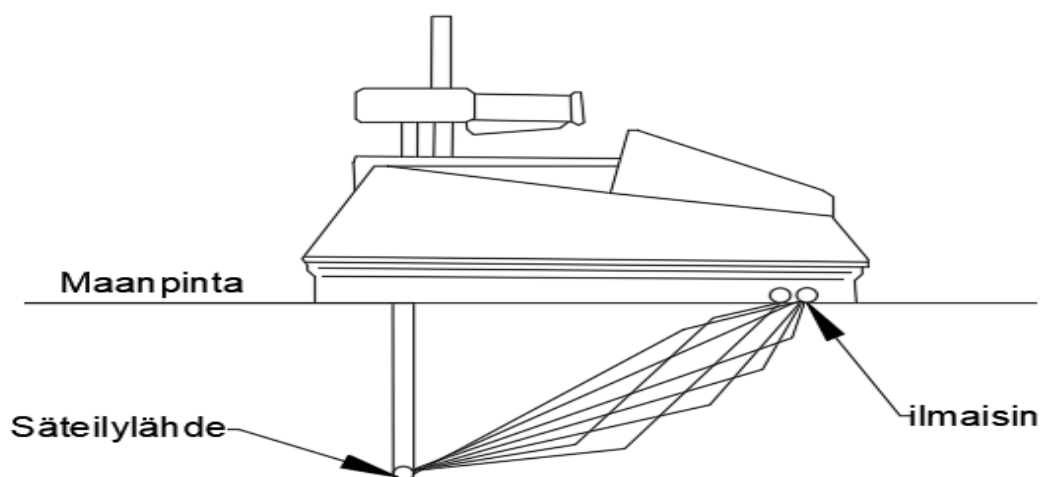
$$\gamma_d = \frac{m_k \cdot g}{V} \quad (15)$$

missä γ_d on kuivatilavuuspaino (kN/m^3), m_k on kuivan näytteen massa (g), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2) ja V kokonaistilavuus (cm^3) (RIL 1985).

Hiekkavolymetrin etuna on se, että sitä voidaan soveltaa karkeiden maarakenteiden tutkimuksessa. Mikäli maa-aines sisältää runsaasti karkeita rakeita, syntyy kaivettuun koekuoppaan usein koloja seinämiin ja pohjaan, mihin hiekan kulkeutumisella ei ole vaikeuksia. Kuitenkin, jos maa-aines on hyvin avointa ja sisältää suuria huokostiloja, voi hiekkaa valua näihin vaikuttaen lopulliseen tilavuuteen. Tilavuuden ollessa suurempi kuin todellisuudessa, maa-aineen tiheys määräytyy liian pieneksi. (Kalliainen et al. 2011)

3.3.3 Troxler-mittalaite

Troxler nimistä mittauslaitetta käytetään samaan tarkoitukseen kuin volymetrikoetta. Troxler-laitteella saadaan tilavuuspainon lisäksi tieto maakerroksen vesipitoisuudesta, jota laite käyttää laskiessaan maakerroksen kuivatilavuuspainon. Mittauslaitteen toiminta perustuu radioaktiiviseen säteilyyn, jossa säteilylähde lähettää säteilyä maa-aineeseen lävitse vastaanottimeen. Tilavuuspaino saadaan mitattua maa-ainekseen absorboituneen säteilyn avulla siten, että vastaanotetun säteilyn voimakkuus on suoraan verrannollinen maa-aineen tiheyteen. Laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 9. (Kalliainen et al. 2011)



Kuva 9. Troxler-laitteen mittausperiaate (mukaillen Jääskeläinen 2014).

Troxler-laitteella voidaan mittaus tehdä pintamittauksena tai suoramittauksena tietyltä syvyydeltä. Kuvan 9 mukaista säteilynlähdettä ei pintamittauksessa työnnetä rakenteeseen vain mitattu tulos edustaa lähinnä rakenteen pinnan tiheyttä. Pintamittauksessa laitteen alapuolelle jäävät epätasaisuudet tulkitaan tyhjäksi tilaksi, joka vaikuttaa virheellisesti Troxlerin antamaan tulokseen. Tämän takia pinnan tulisi olla mahdollisimman tasainen mittaushetkellä. Suoramittauksessa maakerrokseen upotetaan sauva halutulle syvyydelle, jonka päästä säteily kulkeutuu maakerroksen lävitse ilmaisimeen. Karkearakeisissa kerroksissa kuten kalliomurskeessa, voidaan sauvan upottamista helpottaa asentamalla maahan teleskooppiputki, jonka sisään sauva laitetaan. (Kalliainen et al. 2011)

Troxler-mittauslaitteen hyötynä on sen helppo käyttöisyys sekä nopeus tiivistämistyön seuraamiseen, kunhan vain laite on kalibroitu oikein kyseiseen tilanteeseen. Laitteella ei voida mitata tiiveyttä kovin syvältä, minkä takia isompia pengerryksiä tehdessä, on mittauksia tehtävä kerroksittain rakentamisen edetessä. Lisäksi laitteella saadut tulokset saattavat joskus poiketa volymetrikokeista, minkä takia näitä kahta menetelmää olisi hyvä käyttää rinnakkain. Volymetrikokeilla voidaan varmistaa Troxler-mittauksien laatu, jonka jälkeen laitetta voidaan käyttää laajempien mittaussarjojen tekemiseen. (Jääskeläinen 2014)

3.4 Muualla tehtävät laadunvarmistukseen liittyvät toimet (laboratorio)

Laboratoriossa tehtävät laadunvarmistukseen liittyvät tutkimukset ovat yleensä ennakoitava ennen rakentamista niiden aikaa vievän luoteen takia. Tällä tavoin maa-aineksen soveltuvuus rakentamiseen saadaan selville. Laboratoriotutkimuksia voidaan käyttää rakentamisen aikaiseen laadunvarmistukseen, mutta yleensä tiedot niistä saadaan vasta liian myöhään, kun rakenne on jo valmis. Tyypillisimpiä laboratorioissa tehtäviä tutkimuksia laadunvarmistuksen osalta ovat rakeisuuden ja vesipitoisuuden määrittäminen sekä proctor-koe. Vesipitoisuutta käytetään yleensä täydentämään muita maastotutkimuksilla ja laboratoriokokeilla määritettyjä maa-aineksen ominaisuuksia. (RIL 1985) Maalajin rakeisuuden määrittäminen tapahtuu laboratorioissa käyttämällä seulonta-, areometri- tai laserdiffraktiomenetelmiä (Jääskeläinen 2014). Tyypillisimmissä laboratorioissa tehdyissä vedenläpäisykokeissa käytetään, joko vakiopainetta, muuttuvapainetta sekä kiinteäseinäisiä tai joustavaseinäisiä selkeitä (Suomen ympäristökeskus 1995). Tämän lisäksi maalajin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia mineralogia tekijöitä, kuten raemuotoa voidaan tutkia kenttäemissiolähteellä varustetulla mikroanalysaattorilla (Lopez et al. 2012).

Vesipitoisuuden määrittämisessä voidaan käyttää standardin SFS-EN ISO 17892-1:2015 mukaista menetelmää. Standardi antaa ohjeet kokeet suorittamiseen ja siihen, mihin asioihin on kiinnitettävä huomiota. Tärkeimpiä huomioita standardin mukaisesta toiminnasta on, että vesipitoisuus tulisi määrittää näytteestä niin pian kuin on mahdollista, jolloin vesipitoisuudesta saadaan mahdollisimman todenmukainen luonnontilaa edustava tulos. Koenäytteeseen valittavaan vähimmäismassamäärään vaikuttaa maarakeiden enimmäishalkaisija. Näyte tulisi kuivattaa noin 105–110 °C, jotta kaikki normaali vesi irtoaa näytteestä. Liian suuri lämpötila voi irrottaa rakeiden kidevettä, joka antaa virheellisen tuloksen. Vesipitoisuus ilmaisee maan sisältävän veden ja kuivan maa-aineksen massan suhdetta prosenttiyksikkönä ilmaistuna. Vesipitoisuus määritetään kaavan 16 mukaan. (SFS-EN ISO 17892-1:2015)

$$w = \frac{m_v}{m_k} \quad (16),$$

missä w on vesipitoisuus (%), m_v on veden massa (g) ja m_k on kuivan näytteen massa (g) (Rantamäki et al. 1979).

Perinteisiä rakeisuuden määrittämiseen käytettyjä laboratoriomenetelmiä ovat pesu- ja kuivaseulonta sekä areometrikoe. Maalajin rakeisuudella tarkoitetaan eri kokoisten rakeiden suhteellista painojakautumaa näytteessä. Rakeisuus on tärkein maalajin nimitysperuste. (SGY 1985) Hienoaineksen läsnäolo maanäytteissä on yleistä varsinkin moreeneilla ja sen erottamiseen tarvitaan pesuseulontaa. Hienoaineksen määrä on tärkeää tuntea tarkasti, koska sillä voi olla ratkaiseva merkitys esimerkiksi maalajin routivuuden tai vedenläpäisevyyden kannalta. Pesuseulonnassa alle 0,063 mm rakeet pestään näytteestä pois, jonka jälkeen suoritetaan perinteinen kuivaseulonta. Kuivaseulonnan suorittamisen jälkeen rakeisuuskäyrässä huomioidaan pois pestyn maa-aineksen määrä. (Jääskeläinen 2014) Perinteisestä seulasarjasta löytyvät tavallisesti 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0,50, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm seulakoot. Alle 0,063 mm seulakokoja ei käytetä niiden epäluotettavuuden takia. Kuivaseulontaan vaadittavaan näytemäärään vaikuttaa näytteen rakeiden enimmäishalkaisija (D_{\max}), kun yksittäisiä karkeampia rakeita ei huomioida. Seulonnassa vaarana on pienempien seulojen ylikuormittuminen. Tätä varten onkin määritetty ohjeellinen maa-aineksen enimmäismassa, mikä tietylle seulakoolle saa jäädä. Enimmäismassan ylittyessä, on seulonta toteutettava useammassa erässä ja tietylle seulakoolle jäävän maa-aineksen massat ovat laskettava lopuksi yhteen. Rakeisuuden määrittämiseen pesu- ja kuivaseulonnalla on olemassa eurooppalainen standardi SFS-EN ISO 17892-4:2016, joka on Suomessa vahvistettu kansalliseksi standardiksi. (SFS-EN ISO 17892-4:2016)

Areometrikoea tarvitaan määrittämään hienoaineksen raekokojakauma, koska perinteisen kuivaseulonnan tarkkuus loppuu noin 0,063 mm raekokoon paikkeilla (Jääskeläinen 2014). Menetelmä on standardoitu Euroopassa SFS-EN ISO 17892-4:2016 (SFS-EN ISO 17892-4:2016). Suomessa on myös pitkään käytetty GLO-85 geoteknistä laboratorio-ohjetta menetelmän suorittamista varten, joka pohjautuu useampiin ulkomaalaisiin normeihin ja ohjeisiin (SGY 1985). Areometrikoe perustuu Stokesin lakiin (Kaava 17), joka olettaa rakeiden olevan pallon muotoisia. Lain mukaan kappaleen laskeutumisnopeus on suoraan verrannollinen rakeen keskimääräisen läpimitan neliöön. (Rantamäki et al. 1979)

$$v_r = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w)}{18 \cdot \mu_w} \cdot d_a^2 \quad (17)$$

missä v_r on rakeen laskeutumisnopeus (m/s), g on putoamiskiihtyvyys (m/s^2), ρ_s on kivirakeiden tiheys (kg/m^3), ρ_w on veden tiheys (kg/m^3) d on rakeiden halkaisija (m) ja μ_w on veden viskositeetti (Ns/m^2) (Jääskeläinen 2014).

Käytännössä siis menetelmässä seurataan seokseen liettyneen maa-aineksen laskeutumista mitta-astiassa. Maa-aineksen vajotessa, mitta-astian yläosan tiheys alkaa pienentyä, jonka muutosta voidaan seurata areometrillä. Areometrin lukema kertoo välillisesti rakeiden laskeutumisnopeuden, josta voidaan johtaa rakeiden koot ja suhteelliset määrät nomogrammien avulla. (Rantamäki et al. 1979; PANK-2103) Seulonnan ja areometrin tulokset voidaan lopuksi yhdistää samaksi rakeisuuskäyräksi (Jääskeläinen 2014).

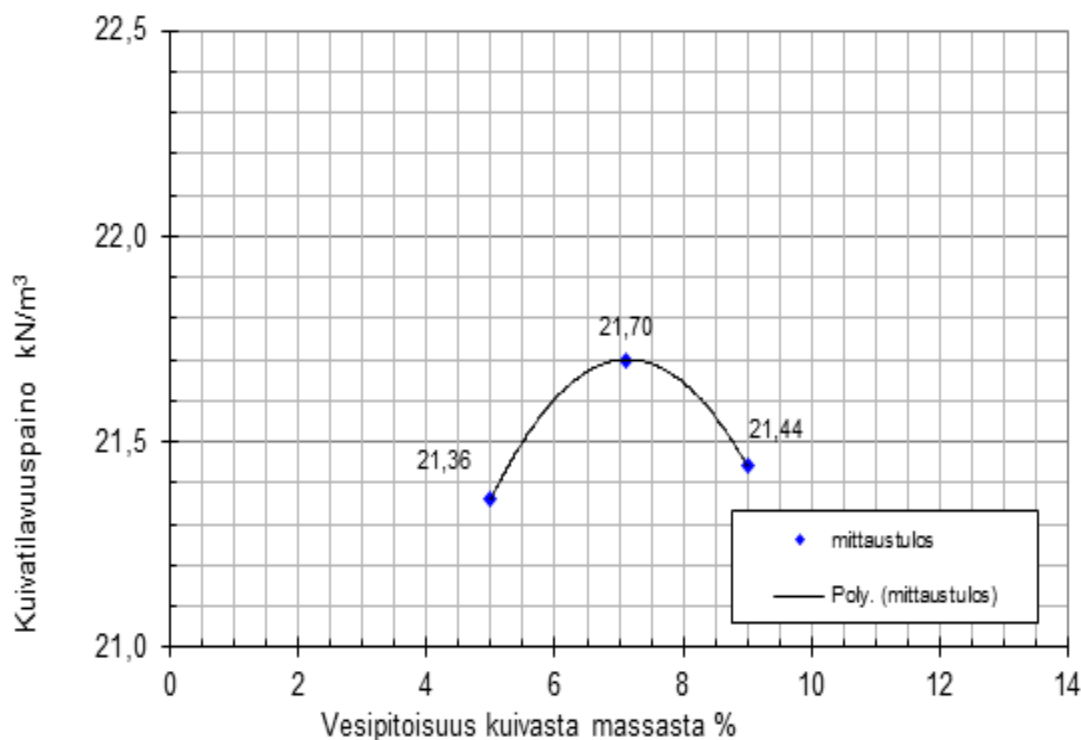
Proctor-koe on laboratoriossa suoritettava maantiivistyskoe, jonka tarkoituksena on määrittää vesipitoisuuden ja kuivatiheyden välistä suhdetta, tiettyä tiivistystyömäärää käyttäen (SFS-EN 1997-2:2007 + AC:2010). Menetelmässä pyritään siis selvittämään maaperänäytteen optimikosteus ja tällä saavutettava maksimikuivatilavuuspaino. Kokeiden tuloksia siis käytetään työmaiden tiiveystarkkailussa sekä tiivistämistyön suunnittelussa. (SGY 1985) Työmaiden maantiivistyskaluston kehittyessä perinteinen proctor-koe korvattiin kokemuspohjaista kehittämistyötä käyttäen parannetulla proctor-kokeella, jonka nimitys on nykypäivänä lähes vakiintunut pelkäksi proctor-kokeeksi (Jääskeläinen 2014). Proctor-kokeesta löytyy eurooppalainen standardi SFS-EN 13286-2, joka on Suomessa vahvistettu kansalliseksi standardiksi (SFS-EN 13286-2). Haluttu tiivistämistyön vaatimus määritellään maanrakennustöissä yleensä tiiveysasteen eli sullonta-asteen avulla. Tiiveysasteella tarkoitetaan työmaalta määritetyn maakerroksen kuivatilavuuspainon suhdetta proctor-kokeella saatuun maksimikuivatilavuuspainoon (kaava 18). (SGY 1985)

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \quad (18)$$

missä D on tiiveysaste eli sullonta-aste (%), γ_d on kuivatilavuuspaino (kN/m^3) ja $\gamma_{d,max}$ on Proctor-kokeella määritetty kuivatilavuuspaino (kN/m^3) (SGY 1985).

Tulokset esitetään kuvaajana, jossa vaaka-akselilla ilmoitetaan näytteestä määritetty vesipitoisuus kokeen jälkeen ja pystyakselilla laskettu kuivatilavuuspaino kuvan 10 mukaan. Vesipitoisuuden määrittämisen jälkeen jokaisen koetoiston kuivatilavuuspaino

lasketaan kaavalla 15. (Rantamäki et al. 1979) Kun mittauspisteet ovat saatu kuvaajaan, piirretään näiden kautta kulkeva suuntaviiva, mistä muodostuu ylöspäin kupera kaari. Kuvaajasta voidaan nyt lukea kaaren lakipisteestä kuivatilavuuspainon maksimi ($\gamma_{d,max}$) sekä tätä vastaava optimivesipitoisuus (w_{opt}). Esimerkiksi kuvan 10 tapauksessa maksimikuivatilavuuspaino on noin $21,70 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuus noin $7,10 \%$. (Jääskeläinen 2014)

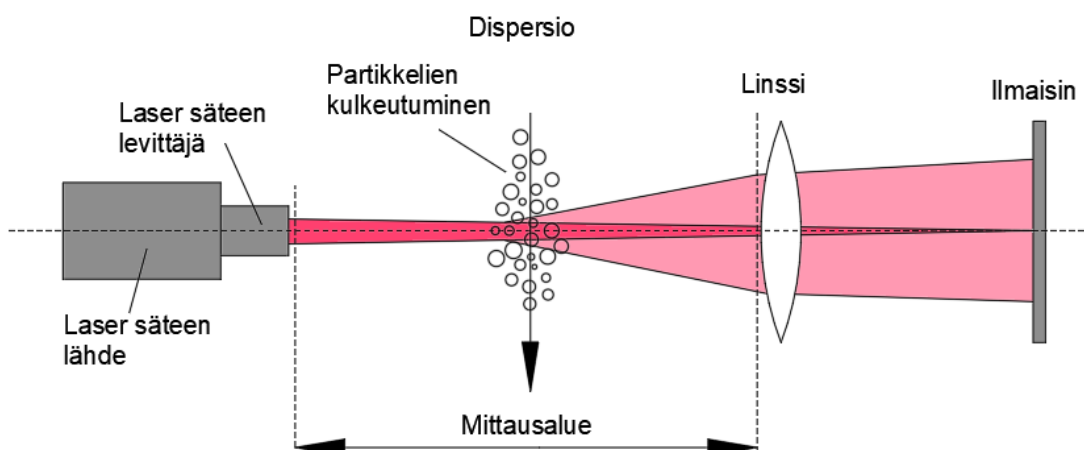


Kuva 10. Proctor-kokeen tulos, jossa optimivesipitoisuus on $7,1 \%$ ja maksimikuivatilavuuspaino $21,7 \text{ kN/m}^3$ (mukaillen Rantamäki et al. 1979).

3.4.1 Laserdiffraktio

Laserdiffraktiossa hyödynnetään valon ja partikkelin välistä diffraktiota raekoon arvioinnissa. Menetelmä on huomattavasti nopeampi kuin perinteiset seulontamenetelmät. Menetelmässä keskitetty lasersäde lähetetään irrallisia partikkeleja kohti. Lasersäteen osuessa partikkeleihin tapahtuu valon diffraktiota eli sirontaa, joka vaihtelee partikkelin koon, lasersäteen aaltopituuden sekä väliaineen ja partikkelin optisten ominaisuuksien vaikutuksesta. Valon sironnan muodostama instensiteettikuvio

muodostuu valon tehon funktiona sirontakulmaan. Sirontakulma on kääntäen verrannollinen partikkelin halkaisijaan. Diffraktioituneen valon teho tietyssä saapumiskulmassa kertoo näin tietyn kokoisten partikkelien lukumäärän. (Lopez et al. 2012) Kuvassa 11 on esitetty laserdiffraaktion toimintaperiaate. Kaksi yleisintä teoriaa, jota laserdiffraktio laitteet hyödyntävät ovat Fraunhoferin diffraktio sekä Mien teoria. Nämä molemmat laskentamenetelmät olettavat, että kaikilla partikkeleilla on pallonmuotoinen muoto. Eli toisin sanoen laserdiffraktiolla mitattu halkaisijan alue vastaa partikkelin kokoa. (Di Stefano et al. 2010)



Kuva 11. Laserdiffraaktion toimintaperiaate (mukaillen Witt & Röthele 1999).

Verrattuna perinteiseen seulontaan, laserdiffraktiolla voidaan saada tuloksia huomattavasti nopeammin ja vähemmällä ihmiskontaktilla. Tämän lisäksi tutkimus voidaan tehdä laajemmalle valikoimalle materiaaleja ja raekokoja sekä märkänä, että kuivana. (Lopez et al. 2012) Laserdiffraaktion tuloksia ei voida käyttää suoraan apuna geoteknisessä suunnittelussa, vaan areometria vastaava kalibrointi vaaditaan (SFS-EN 1997-2:2007 + AC:2010). Tutkimukset laserdiffraaktion ja areometrin tuloksista osoittavat ristiriitoja ja epävarmuutta etenkin saviaineksen osalta. Tutkimuksessa on huomattu laserdiffraaktion aliarvioivan saviaineksen osuutta. (Lopez et al. 2012) Tämän lisäksi menetelmän on havaittu yliarvioivan siltin ja hiekan osuutta (Orzechowski 2014). Tuloksia voi selittää partikkelien luonnollinen muoto, joka ei ole pallomainen, niin kuin laserdiffraktio olettaa (Konert & Vandenberghe 1997). Tuloksiin voidaan vaikuttaa

valitsemalla oikea näytteiden esikättely. Esikäsittelyllä tavoitellaan näytteen partikkelien toisistaan erottamista, joka voidaan tehdä esimerkiksi dispersioaineilla tai ultraäänitekniikoilla. (Lopez et al. 2012)

3.4.2 Mikroskooppitutkimus

Mikroskooppitutkimuksia käytetään laadunvarmistuksessa esimerkiksi varmistamaan, etteivät rakennusmateriaalit sisällä potentiaalisesti happoa tuottavia mineraaleja tai yhdisteitä (Ympäristöministeriö 2020). Mikroskooppitutkimuksia tehdään monenlaisilla erilaisilla laitteilla, jotka soveltuvat eri tarkoituksiin. Yksi tällainen laite on FE-EPMA eli kenttäemissiolähteellä varustettu mikroanalysaattori. Menetelmällä pystytään eittuhoavaan kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen alkuaineanalyysiin. Menetelmällä voidaan havaita hyvin pieniä pitoisuuksia sekä tehdä esimerkiksi partikkelikokojakauma-analyyseja ja ottaa lähikuvia näytteistä korkealla resoluutiolla. Kuva muodostuu elektronisäteestä, jota kiihdytetään linssien läpi tietyllä jännitteelle. Kun elektroni osuu näytteeseen se siroaa takaisin ilmaisimeen materiaalin alkuaineen ominaisella atomiluvulla. Muodostuneessa kuvassa raskaat alkuaineet nähdään kirkkaana ja kevyemmät tummempana. Elektronin ja näytteen kohtaamisesta syntyy alkuaineelle ominaista röntgensädettä, jota ilmaisemalla voidaan selkeyttää, mistä alkuaineesta materiaali koostuu. Mikroanalysaattoria voidaan siten soveltaa mineralogisissa tutkimuksissa. (Llovet et al. 2020)

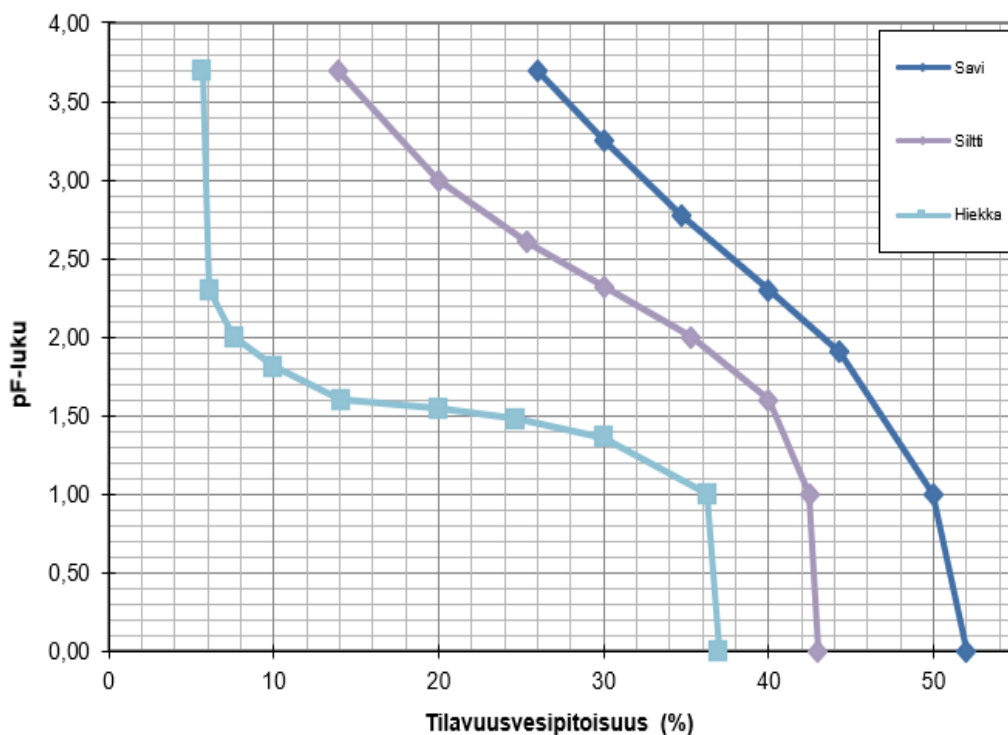
3.4.3 Vedenpidätyskyky

Vedenpidätyskyvyllä kuvataan vesipitoisuuden ja veden pidätysvoiman eli painepotentiaalin suhdetta. Maa-aineksella vedenpidätyskyky kertoo sen ominaisuuksista pidättää ja irrottaa vettä alipaineen alaisena. Vedenpidätyskyvyn kuvaajaa esitetään pF-käyrän avulla, jossa vesipitoisuus on vaaka-akselilla ja veden pidätysvoima pystyakselilla. Käytännössä pF-luku ilmaisee vesipatsaan korkeuden senttimetreissä 10-kantaisena logaritmina. Esimerkiksi pF-luvulla 3, veden irrottamiseksi maasta vaaditaan 1 000 cm vesipatsaan aiheuttama alipaine. (Airaksinen 1978) Maan sisältämä vesi, joka on tasapainotilassa sitä ympäröivän vapaan veden kanssa, on tasapainotilassa, jolloin painepotentiaali on nolla ja maa-aines täysin saturoitunut (SFS-EN ISO 11274:2019). Mitä enemmän maa-aines on vapauttanut vettä, sen enemmän potentiaalienergiaa vaaditaan lisäveden irrottamiseen (Latvala 2018). Maan vesipitoisuus vaikuttaa

huomattavasti siihen, miten helposti vesi pääsee liikkumaan maassa. Maan hydraulinen johtavuus siis muuttuu painepotentiaalin muuttuessa. (Paasonen-Kivekäs et al. 2016)

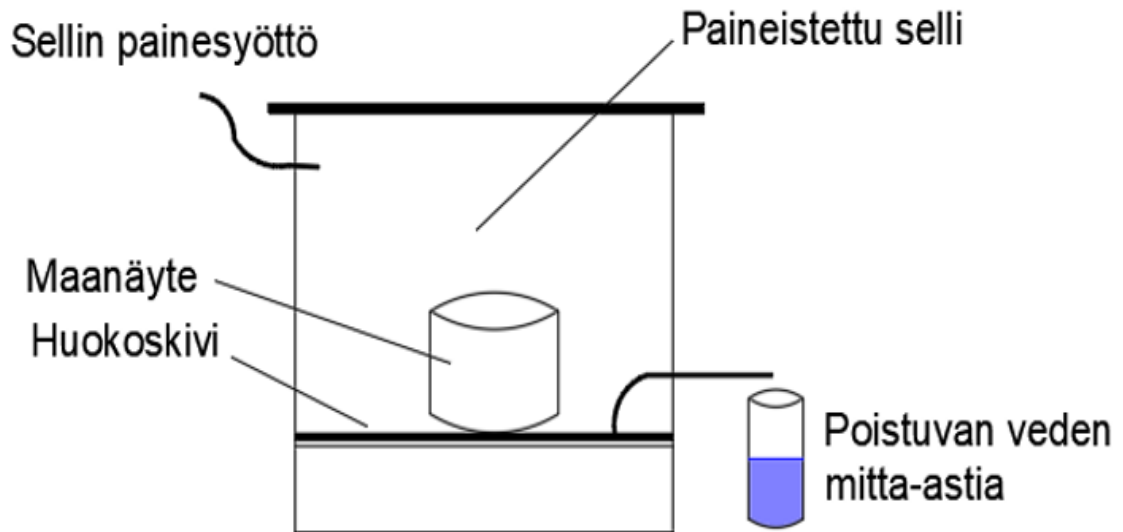
Yksinkertaistettuna, vettä esiintyy maaperässä vapaana ja sitoutuneena vetenä. Vapaaksi vedeksi kutsutaan sitä vettä, joka liikkuu maa-aineksen huokostilassa gravitaation vaikutuksesta. Veden pidättäytyminen maapartikkeleihin tapahtuu useiden voimien seurauksena, kuten osmoosio-, adsorptio- ja kapillaarisivoimin. Vapaan veden jälkeen uloimpana maapartikkeliin sitoutuneena vetenä on kapillaarivesi, joka kiinnittyy maapartikkelien väliin pintajännityksien vaikutuksesta ja ei reagoi gravitaation vaikutukseen. Kapillaanin vesi on irrotettavissa maa-aineksesta ilmakeivatuksella. Maapartikkelia lähimpänä vetenä on adsorptio- eli vaippavesikerros, joka voidaan jakaa tiukemmin ja löyhemmin sitoutuneisiin kerroksiin. (Head 1980) Adsorptiovesi kiinnittyy maapartikkeleihin elektrostaattisten voimien johdosta niin tiukasti, että sen irrottamiseen maapartikkelista vaaditaan selvästi yli 100 °C lämpötila (Jääskeläinen 2014). Adsorptioveden lisäksi partikkelin kiderakenteeseen on sitoutunut vettä, joka ei ole irrotettavissa uunikeivatuksen avulla (Head 1980).

Kuvassa 12 on esitetty tyypillisen saven, siltin ja hiekan vesipitoisuuden suhdetta alipaineeseen, josta nähdään, että erilaiset maalajit käyttäytyvät selkeästi eri tavoin. Maalajin lisäksi vedenpidättäytymiseen vaikuttaa maan tiiveysaste. (Latvala 2018) Menetelmä on standardoitu Euroopassa SFS-EN ISO 11274:2019 ja se on hyväksytty suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi (SFS-EN ISO 11274:2019).



Kuva 12. Tyypillisiä vedenpidätyskäyriä eri maalajeille, jossa x-akselilla tilavuusvesipitoisuus (%) ja y-akselilla pF-luku (mukaillen Tuller & Or 2004).

Kuvassa 13 on esitetty vedenpidätyskyvyn määrittämiseen käytetty pF-laitteisto sekä sen toiminta periaate. Kokeessa kyllästynyt näyte asetetaan selliin ja se paineistetaan haluttuun tasoon. Näytteen kyllästämiseen vaadittava aika riippuu maalajista, esimerkiksi hiekoilla kyllästämiseen voi riittää yksi päivä, kun taas savilla vaadittava aika voi olla yli kaksi viikkoa. (SFS-EN ISO 11274:2019) Paineistuksen johdosta vesi purkautuu näytteestä huokoskiven kautta ulos astiasta. Tasapainotila saavutetaan, kun vettä ei enää purkaannu näytteestä sen hetkisellä painetasolla. Näyte punnitaan aina ennen seuraavalle painetasolle nostamista. Maksimi painetaso, jota voidaan kokeessa käyttää, riippuu maalajin ominaisuuksista. (Latvala 2018) Kun haluttuun painetasoon on päästy, näyte punnitaan viimeisen kerran ja todellinen vesipitoisuus määritetään standardin SFS-EN ISO 17892-1:2015 mukaan.



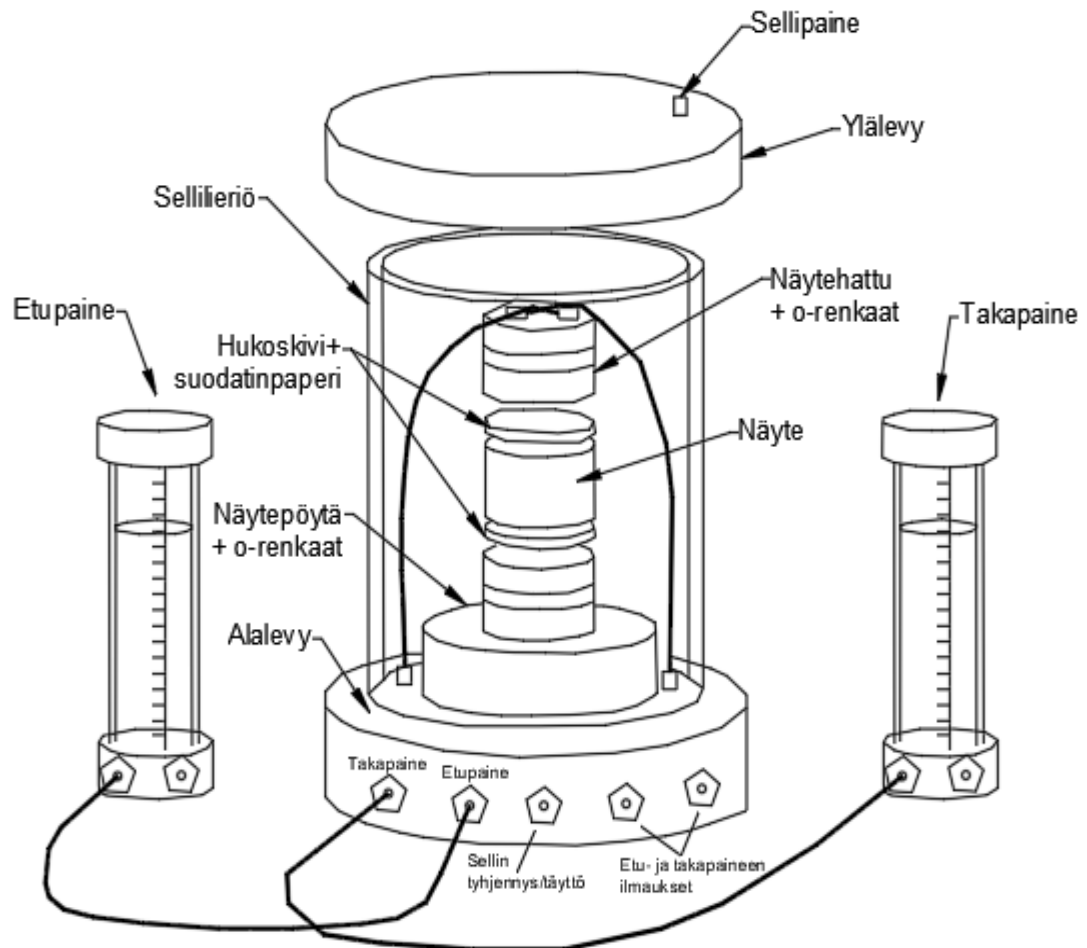
Kuva 13. Vedenpidätyskyvyn määrittämiseen käytetty pF-laitteisto ja sen toimintaperiaate. Sellin sisällä vallitseva paine poistaa vettä maanäytteestä huokoskiveä pitkin letkulle, josta vesi poistuu sellistä. (mukaillen Latvala 2018)

3.4.4 Muuttuvapainekoe joustavaseinämisellä sellillä

Laboratoriossa vedenläpäisevyys voidaan määrittää usealla eri menetelmällä. Menetelmän valintaan vaikuttaa kokemusperäinen tieto materiaalin vedenläpäisevyydestä. Moreeneilla esimerkiksi vedenläpäisevyys on tunnetusti sen verran pieni, että muuttuvapainekorkeus sekä joustavaseinäminen selli vaaditaan yleensä luotettavien tulosten saamiseksi. (Suomen ympäristökeskus 1995) Menetelmästä löytyy sekä Eurooppalainen SFS-EN ISO 17892-11:2019, että amerikkalainen standardi ASTM D 5084-90 (ASTM D 5084-90; SFS-EN ISO 17892-11:2019).

Amerikkalaisen standardin ASTM D 5084-90 mukainen testi aloitetaan valmistelemalla näyte haluttuun tiiveyteen muottiin. Tiivistys tulee suorittaa kerroksittain siten, että kerrosten rajapinnat karhennetaan esimerkiksi haarukalla tai vastaavalla työkalulla. Paakkuuntuneita maa-aineksia ei saa hajottaa, mikäli ei ole varmuutta, että paakut hajoaisivat rakentamisen aikana kentällä. Yksittäiset paakut tai isommat partikkelit eivät saa olla yli kuudesosan kokoisia näytteen halkaisijaan verrattaessa. Kun tiivistäminen on

tehty, näyte poistetaan muotista, punnitaan sekä sen halkaisija ja korkeus mitataan. Seuraavaksi näytteen ylä- ja alapäähän asetetaan näytteen halkaisijan muotoiset kyllästetyt suodatinpaperit ja huokoskivet sekä näyte suljetaan kumikalvon sisään. Tämän jälkeen näyte asetetaan näytepöydälle vedenläpäisevyyslaitteistoon ja näytehattu näytteen päälle, jonka lisäksi näyte suljetaan muovikalvoon o-renkaiden avulla kuvan 14 mukaisesti. (ASTM D 5084-90)



Kuva 14. Joustavaseinäinen vedenläpäisevyyslaitteisto (mukaillen Jääskeläinen 2014).

Seuraavaksi selli suljetaan ja tarvittavat letkutukset kiinnitetään byrettien ja paineistuksen välille. Byretit ja selli tulisi täyttää ilmattomalla vedellä, joka estää ilman tukkimasta veden liikettä kokeen aikana. Tämän jälkeen laitteiston paineistus voidaan aloittaa siten, että sellipainetta nostetaan maksimissa 35 kPa. Myös etu- ja takapainetasoja nostetaan, mutta ei koskaan yli sellipaineen. Paineistettu laitteisto tulisi ilmata, jotta letkuihin jäänyt

ilma saadaan pois ennen kokeen aloittamista. Selli-, etu- ja takapaineen lopulliset halutut painetasot riippuvat näytteen ominaisuuksista ja kyllästysasteesta. Esimerkiksi näytteellä, jonka alkuperäinen kyllästysaste on 90 %, tulisi käyttää 350 kPa takapainetta, jotta saavutetaan 99 % kyllästysaste. Painetasoa tulisi nostaa maltillisesti aseittain niin, että näyte ehtii sopeutua muutokseen. Riippuen materiaalin ominaisuuksista, tiettyä painetasoa voidaan joutua pitämään useita tunteja ennen seuraavaan painetasoon nostamista. Alkuperäinen ja lopullinen kyllästysaste voidaan arvioida mittaamalla näytteen halkaisija ja korkeus ennen ja jälkeen kokeen, kun tiedossa on näytteen alkuperäinen vesipitoisuus sekä massa alussa ja lopussa. Näytteen mittojen ottaminen ylös on tarpeellista, koska materiaalista riippuen näyte voi paisua tai konsolidoitua kokeen aikana. Amerikkalaisen standardin mukaan näytteen kyllästysasteen tulisi olla vedenläpäisevyyden mittaushetkellä 95–105 %. (ASTM D 5084-90)

Kun haluttu painetaso on saavutettu ja näyte kyllästynyt niin, että näytteen läpi virtaavaa vettä ei enää jää matkalle, voidaan mittaaminen aloittaa. Mittaaminen tapahtuu byreteistä löytyvistä mitta-asteikoista, joista voidaan seurata veden virtausta näytteen läpi tietyssä ajassa. Mittauksessa käytettävä lopullinen hydraulinen gradientti riippuu materiaalin tunnetusta vedenläpäisevyydestä. Hydraulisen gradientin nostolla voidaan nopeuttaa huonosti vettä johtavien materiaalin mittausaikaa. Hydraulinen gradientti ei voi olla liian suuri, koska näyte saattaa konsolidoitua liikaa tai näytteen hienoaines voi lähteä liikkeelle tukkien laitteiston. Esimerkiksi näytteellä, jonka vedenläpäisevyys on pienempi kuin $1 \cdot 10^{-7}$ m/s suositellaan käytettäväksi maksimissaan 30 suuruista hydraulista gradienttia. Mittausta jatketaan niin kauan, että saadaan neljä peräkkäistä vedenläpäisevyyden arvoa, jotka eivät poikkea huomattavasti toisistaan. (ASTM D 5084-90) Vedenläpäisevyys määritetään kaavalla:

$$k = \frac{A_b \cdot H_n}{-2 \cdot A \cdot t} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (19)$$

missä k on vedenläpäisevyys kokeen aikaisessa lämpötilassa (m/s), A_b on byretin vesisäiliön poikkileikkauksen pinta-ala (m²), H_n on näytteen korkeus (m), A on näytteen poikkileikkauksen pinta-ala (m²), t on mittausten välinen aika (s), h_1 on vedenpaineen muutos etubyretissä tietyllä ajanjaksolla (m), h_2 on vedenpaineen muutos takabyretissä tietyllä ajanjaksolla (m) (ASTM D 5084-90).

Mikäli kokeen aikainen veden lämpötila poikkeaa 20°C, korjataan vedenläpäisevyys tyypillisesti siihen kaavalla:

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (20)$$

missä k_{20} on vedenläpäisevyys 20°C lämpötilassa (m/s), R_T on veden viskositeetin korjauskerroin $(-0,02452 \cdot \text{Lämpötila} + 1,495)$ ja k on vedenläpäisevyys kokeen aikaisessa lämpötilassa (m/s) (ASTM D 5084-90).

4 KOHDEALUE JA TEHDYT TUTKIMUKSET

Tutkimuksen kohdealue sijaitsee Pohjois-Suomessa, noin 35 km Kittilän keskustasta koilliseen sijaitsevalla Agnico-Eagle Finland Oy:n kultakaivoksella. Tarkemmin tutkimukset sijoittuvat kaivoksen pohjoisosassa sijaitsevaan uuden NP4-rikastushiekka-altaan alueelle (Kuva 15). Tutkimuksien aloitushetkellä NP4-allas oli rakennusvaiheessa, jolloin osa sen reunapadosta ja pohjarakenteista olivat jo valmiina. Moreenia käytetään alueella rikastushiekka-altaiden pohja- ja patorakenteissa sekä peite- ja sulkurakenteissa tiivisterakenteena. Moreenin tulee täyttää siltä vaaditut rakenteelliset ominaisuudet, jotta sen toiminnasta tiivisteinä voidaan varmistua. Näitä ovat esimerkiksi lujuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudet. Moreenin lisäksi altaan pato- ja pohjarakenteissa käytetään lisätiivisteinä bitumigeomembraania (BGM).



Kuva 15. Ilmakuva rakenteella olevasta NP4-rikastushiekka-altaasta (Kuva Joonas Toivanen, AFRY Finland Oy, Syksy 2020).

4.1 Kohdealueen moreeni

Alueen maaston topografia vaihtelee 190–260 metrin korkeudella merenpinnan yläpuolella, josta kaivoksen ympäristön maiseman muodostavat matalat metsät ja suoalueet. Maaperää peittävät jääkauden jälkeiset turvemuodostumat sekä osin jääkauden aikaiset silttiset ja hiekkaiset järviskerrostumat. Turpeen alta löytyy tyypillisesti

moreenipeitekerrostumia, jotka ovat yleensä noin 1–6 metriä paksuja. Kallion pinta moreenin alla on yleensä mekaanisesti rapautunutta rapakalliota. (Härkönen 1997)

Kohdealueen sijainti on historiassa toistuvasti toiminut jäänjakaja-alueena myöhäisen kvartaarikauden mannerjäätiköitymisien aikana. Jäänjakaja-alueella tarkoitetaan sellaista maaston muodostelmaa, jossa jää pysyi lähes paikallaan ja virtasi muodostelmasta pois päin. (Johansson & Kujansuu 2005) Alueen tyypillinen moreenistratigrafia muodostuu kolmesta erilaisesta moreenipatjasta, jotka luokitellaan moreenipatjoiksi I, II ja III. Tämän lisäksi alueella on havaittu vanhempia moreenipeitteitä IV ja V. Moreenipatjojen luokitukset ovat määritelty Hirvaksen toimesta. (Hirvas et al. 1977)

Moreenipatja I esiintyy paikallisesti 0,5–1 metriä paksu kerrostuma, joka on muodostunut jäätikön sulamisvaiheessa. Alueella tavattavista moreenikerrostumista se on nuorin ja päällimmäisenä. Moreenipatjaa I on kuvailtu pohjamoreeniksi, mutta samantapaisia ominaisuuksia on havaittu alueen valumismoreeneilla. Väriltään tämä moreeni on ruskeaa tai harmaata, ja sen aines on lamellirakenteista tai rakeetonta sekä löyhään pakkautunutta. Siinä saattaa esiintyä ohuita lajittuneita kerroksia. Moreenipatjaan I lukeutuvat moreenit tyypillisesti luokitellaan hiekkamoreeneiksi. Tyypilliseen pintamoreeniin verrattuna moreenipatja I on karkeampaa, kivisempää ja tiiviimpään pakkautunutta sekä sitä esiintyy paksumpina kerroksina. (Hirvas 1991; Johansson & Kujansuu 2005; Peltoniemi-Taivalkoski & Sarala 2009)

Moreenipatja II esiintyy yleensä selvästi paksumpana kerroksena kuin moreenipatja I. Sen paksuus vaihtelee metristä jopa kymmeneen metriin. Tämä moreeni on syntynyt viimeisimmän jääkauden aikana jäätikön virratessa lännestä itään. Alueen maaperässä se esiintyy lähes yhtenäisenä katkeamattomana patjana. Moreenipatja II lukeutuu pohjamoreeniksi, ja sen rakenteessa esiintyy vaihtelevaisuutta. Rakenne voi olla massamaista, kerrosrakenteista, juovaista ja paikoin lamellirakenteista. Moreenipatjaan I verrattuna moreenipatja II on selvästi tiiviimpään pakkautunutta sekä runsaskivisempää, mutta lohkareita siinä on vähän. Kohdealueella se esiintyy väriltään pääsääntöisesti ruskeana. (Hirvas et al. 1977; Hirvas 1991; Johansson & Kujansuu 2005; Peltoniemi-Taivalkoski & Sarala 2009)

Moreenipatja III on kerrostunut todennäköisesti Varhais-Vekselin aikana, varhaisen luode-kaakko suuntaisen jäätikön virtauksen vaiheessa. Moreenipatjoista I ja II poiketen

moreenipatjan III rakenteessa ei esiinny paljoa vaihtelua. Tämän lisäksi kyseinen moreeni on kivisempää, lohkareisempaa ja tiiviimpään pakkautunutta, kuin nuoremmat moreenipatjat. Moreenipatjan III paksuutta ei ole luotettavasti pystytty määrittelemään, koska se on vain harvoin pystytty lävistämään. Väriltään se esiintyy lähes poikkeuksetta harmaansävyisinä. Moreenipatja on yleensä rakeeton ja sen lamellirakenteet on usein havainnoitu kasvavan syvyyden mukana. Tässä moreenipatjassa voi esiintyä lajittuneiden aineksien välikerroksia sekä yleensä se luokitellaan hienoksi hiekkamoreeniksi. (Hirvas et al. 1977; Hirvas 1991; Johansson & Kujansuu 2005; Peltoniemi-Taivalkoski & Sarala 2009)

Vanhemmat moreenit eli moreenipatjat IV ja V ovat harvinaisia ja esiintyvät alueella vain syvempien maaleikkausten kohdilla. Kyseisten kerrosten läpäiseminen ei ole ollut mahdollista, minkä takia niiden kerrospaksuudesta ei ole tarkkaa tietoa. Niiden suutaus, stratigrafinen asema sekä moreenipatjojen välissä esiintyvät lajittuneiden ainesten kerrokset kertovat, että nämä moreenipatjat ovat kerrostuneet usean eri jäätiköitymisen aikana. Rakenteeltaan ne ovat betonimaisen kovaa ja hyvin tiukka pakkautuneita. Moreenipatjan IV aines on hyvin lamellirakenteista ja moreenipatjan V taas massamaista. Molemmissa kerroksissa esiintyy runsaasti rapautunutta kiviainesta. Väriltään näitä moreeneja on tavattu ruskeana ja harmaana. (Hirvas et al. 1977; Hirvas 1991; Johansson & Kujansuu 2005)

4.2 In situ -tutkimukset

Tutkimuspisteiden sijainnit valittiin edustamaan kattavasti ja tarkasti NP4-rikastushiekka-altaan alueella esiintyviä moreenipeitteitä ja -rakenteita. Tutkimusalueiksi valikoitui kolme erilaista kohdetta, joissa kussakin tehtiin tutkimuksia kolmella tutkimuspisteellä. Nämä alueet olivat:

- Site 1: Leikattu ja tiivistämätön moreeni
- Site 2: Leikattu ja tiivistetty moreeni
- Site 3: Rakennettu ja tiivistetty padon moreenitiiviste

Tutkimusalueiden jakamisen tavoitteena oli vertailla niissä esiintyviä moreeneja. Tietoisia eroja olivat esimerkiksi alueilla tehdyssä tiivistämistyössä sekä moreenien leikkaamisessa ja kuljettamisessa. Oletuksena oli, että alueiden moreeneista paljastuisi

tutkimuksissa eroavaisuuksia esimerkiksi vedenläpäisevyydessä, rakeisuudessa ja raemuodossa, joita voitaisiin myöhemmin käyttää vedenläpäisevyyteen vaikuttavien tekijöiden määrittämisessä. Liitteestä 1 löytyy ilmakehäkuva alueesta, jossa tutkimusalueet ovat merkittyinä. Tarkemmat pisteiden koordinaatit ja korot ovat esitettyinä alueittain taulukossa 5. Pisteiden käytetty koordinaatistojärjestelmä oli KKJ 2 sekä korkeusjärjestelmä N60. Site-tutkimusalueisiin ja niiden tutkimuspisteisiin viitattaessa käytetään myöhemmin työssä lyhenteitä seuraavasti S1P1 tai S3P2, jossa S1P1 kuvaa site 1 -tutkimusalueen tutkimuspistettä 1 ja S3P2 site 3 -tutkimusalueen tutkimuspistettä 2.

Taulukko 5. Tutkimuspisteet ja niiden paikkatieto (liite 1).

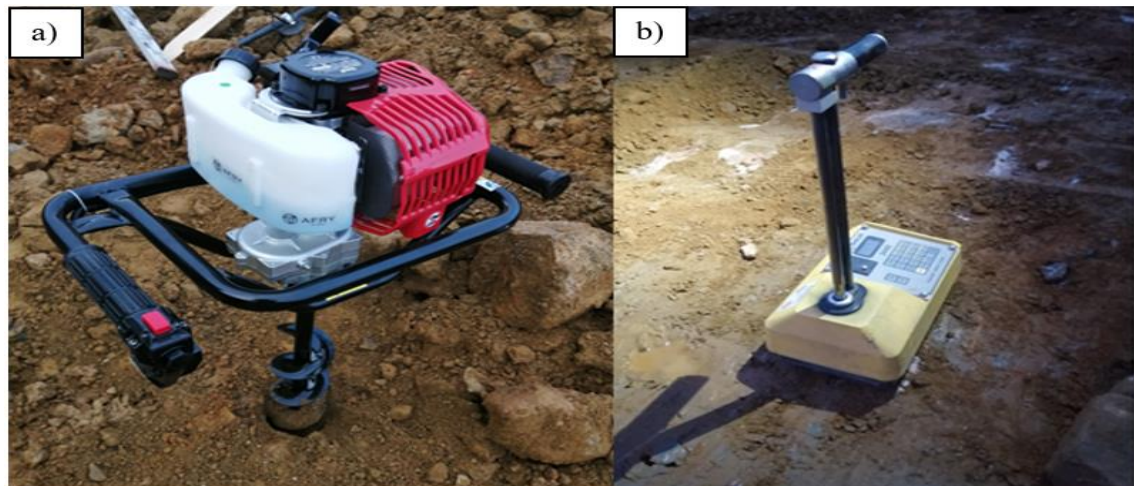
<i>Tutkimusalue</i>	<i>Tutkimuspiste</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
<i>SITE 1 (Leikattu ja tiivistämätön Mr)</i>	Tut. Piste 1	2560571,178	7540370,863	226,000
	Tut. Piste 2	2560594,657	7540377,849	225,741
	Tut. Piste 3	2560608,508	7540371,801	225,715
<i>SITE 2 (Leikattu ja tiivistetty Mr)</i>	Tut. Piste 1	2560206,789	7540106,780	225,032
	Tut. Piste 2	2560219,267	7540118,971	225,207
	Tut. Piste 3	2560239,455	7540127,703	225,082
<i>SITE 3 (Rakennettu ja tiivistetty padon Mr tiiviste)</i>	Tut. Piste 1	2559568,715	7540096,369	230,758
	Tut. Piste 2	2559589,250	7540123,801	231,238
	Tut. Piste 3	2559614,233	7540158,700	231,482

Tehdyt in situ -tutkimukset alueittain ja pisteittäin löytyvät taulukosta 6. Tutkimuksien ajankohta sijoittui marraskuulle 2020. Tutkimukset olivat hiekkavolymetrikoe, vedenläpäisevyys Guelph-permeometrillä sekä maan tiiveys ja vesipitoisuus Troxlerilla määritettynä. Guelph-permeometrillä suoritettavaan mittaukseen vaadittu maahan porattava reikä tehtiin bensiinikäyttöisellä maakairalla, koska käsikairalla oli hankaluuksia läpäistä maaperää sekä päästä tavoitesyvyyteen. Myöhäisen vuodenajankohdan takia routiminen piti ottaa huomioon tavoitesyvyyksiä suunnitellessa. Jokainen tehty reikä harjattiin aluksi maahuokosten avaamiseksi ennen mittauksien aloittamista. Guelph-permeatrilla tehtävät vedenläpäisevyyden mittaukset pyrittiin pitämään vähintään 30 minuutin mittaisina tai kolmena peräkkäisenä tasaisena tuloksena, molemmilla painamenetelmillä. Veden hitaan imeytymisen takia laitteessa käytettiin sisempää vesisäiliötä. Mittaustuloksia kirjattiin ylös vähintään 5 minuutin välein. Troxler-mittaukset suoritettiin maanpinnasta. Kaikilla tutkimusalueilla Troxler-mittauksia jouduttiin toistamaan useamman kerran maan epätasaisuuksien takia.

Kairauskalusto sekä Troxler-mittauslaite ovat esitetty kuvassa 16. Volymetrikoe suoritettiin käyttäen tasarakeista hiekkaa. Volymetrikoe tehtiin taulukossa 6 esitettyjen pisteiden läheisyyteen edustamaan koko tutkimusalueiden tiiveysastetta.

Taulukko 6. Tutkimusalueittain tehdyt in situ -tutkimukset.

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>Vedenläpäisevyys (Guelph-permeametri)</i>	<i>Volymetrikoe</i>	<i>Tiveys ja vesipitoisuus (Troxler)</i>
<i>S1P1</i>	x		x
<i>S1P2</i>	x		x
<i>S1P3</i>	x	x	x
<i>S2P1</i>	x		x
<i>S2P2</i>	x		x
<i>S2P3</i>	x	x	x
<i>S3P1</i>	x		x
<i>S3P2</i>	x		x
<i>S3P3</i>	x	x	x



Kuva 16. In situ -mittauksissa käytettyä kalustoa, jossa vasemmalla a) maapora ja oikealla b) Troxler-mittalaite (Kuva Juha Falben).

Tutkimusalueilla tehtyjen in situ -kenttätutkimuksien lisäksi tutkimuspisteillä tehtiin näytteenotto. Näytettä otettiin jokaisesta tutkimuspisteestä kolme 10 litran sankoa eli noin 45–50 kg (Kuva 17). Lisäksi jokaiselta tutkimusalueelta kerättiin näytettä osana volymetrikoeita.



Kuva 17. Site 1 -tutkimusalueelta kerättyä moreeninäytettä (Kuva Juha Falben).

4.2.1 Site 1 -tutkimusalue

Site 1 -tutkimusalue sijaitsi NP4-rikastushiekka-altaan itäreunassa rakentamattomalla alueella. Alueen tarkoituksena oli edustaa luonnontilaista vastaleikattua moreenikerrostumaa, jota ei ollut muulla tavoin muokattu tai häiritty (Kuva 18). Alueella sijaitsi pieni rinne, jonka reunasta leikkaus tehtiin kaivinkoneella. Leikkauksen syvyys vaihteli arviolta noin 3–5 metriä leikkauksen reunasta.



Kuva 18. Tutkimusalue site 1, leikattu ja tiivistämätön moreeni (Kuva Juha Falben).

Tutkimukset alueella toteutettiin kahdessa päivässä. Ensimmäisenä päivänä mittaukset suoritettiin tutkimuspisteillä 1 ja 3, jolloin lämpötila oli noin 3°C. Sääolosuhteet olivat suurimman osan päivästä selkeät, lukuun ottamatta yöllä satanutta pientä lumikuuroa, joka aamun edetessä muuttui tihkusateeksi, ennen sen loppumista. Toisena tutkimuspäivänä suoritettiin volymetrikoe sekä mittaukset tutkimuspisteellä 2. Tutkimuksien välisenä yönä lämpötila käväisi pakkasen puolella, mutta maaperä ei aamulla ollut roudassa. Sääolosuhteet olivat selkeät ja lämpötila oli nolla tuntumassa. Silmämääräisesti alueen havaittiin olevan kivistä. Alueella esiintyi myös kiviä, jotka luokitellaan raekoon mukaan lohkkareiksi (Kuva 19).



Kuva 19. Site 1 -tutkimusalueella havaittiin moreenissa lohkaraita (Kuva Juha Falben).

Haasteita in situ -tutkimukselle aiheutui maan tiiveydestä ja kivisyydestä, sillä siihen oli vaikea saada kairattua tutkimusreikää. Usean yritykset jälkeen 3 halkaisijaltaan 10 cm kairareikää saatiin tehdyksi 27...31 cm syvyyksille. Syvemmille kairauksille ei ollut tarvetta, koska kaivinkoneella tehty leikkaus oli usean metrin syvyinen. Kairauksien syvyydet ja halkaisijat pisteittäin ovat esitettynä taulukossa 7.

Taulukko 7. Kairausten syvyydet ja halkaisijat tutkimuspisteittäin site 1:llä.

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>S1P1</i>	<i>S1P2</i>	<i>S1P3</i>
<i>Päivämäärä</i>	5.11.2020	6.11.2020	5.11.2020
<i>Kairauksen syvyys</i>	32 cm	27 cm	31 cm
<i>Kairareiän halkaisija</i>	10 cm	10 cm	10 cm

Guelphin asentamisessa ei käytetty laitteen mukana tullutta kolmijalkatukea vaan telinettä, joka oli vakaampi tuulisella kaivosaukiolla. Kuvassa 20 on esitetty Guelph-permeametri asennettuna telineeseen ja valmiina mittaukseen site 1 alueella. Guelph-permeametri-mittauksissa käytettiin sekä yksipaine-, että kaksipaine-menetelmää. Paine korkeutta tasojen välillä oli 10 cm. Yksipaine-menetelmä onnistui pisteillä pääsääntöisesti ensimmäisellä yrittämällä, paitsi tutkimuspisteellä 3 toisella yrittämällä. Kaksipaine-menetelmä onnistui tutkimuspisteellä 1, mutta pisteillä 2 ja 3 oli haasteellista. Mahdolliseksi ongelman syyksi näissä mittauksissa havaittiin kairareiän reunoilta irtaavan hienoaineksen liettyminen kuopan pohjalle, joka näytti tukkivan Guelphin suodattimen. Hienoainesta yritettiin poistaa kuopan pohjalta ennen kuin mittauksia kokeiltiin uudemman kerran (Kuva 21). Pisteellä 2 havaittiin suuri kivi kairareiän sivussa.

Näytteenotot suoritettiin mittausten yhteydessä. Näytteet kerättiin kairanreikien ympäriltä lapiolla, kuitenkin niin, että Guelph-permeametrin osittain kyllästämää moreenia ei sekoittunut näytteeseen. Troxler-mittaukset alueella tehtiin maanpinnasta, jota yritettiin hieman tasata lapiolla isoimmista kivistä ja koloista. Volymetrikokeessa vaikeuksia tuotti lapion pureutuminen maahan sekä pinnan epätasaisuus kaivetun kuopan ympärillä. Volymetrikokeessa hiekkaa pyritettiin vierittämään tasaisesti toisten hiekkarakeiden päälle, jotta hiekka ei tiivistyisi.



Kuva 20. Guelph-permeametrin mittaus käynnistymässä tutkimuspisteellä 2 site 1:llä (Kuva Juha Falben).



Kuva 21. Tutkimuspisteillä havaittiin ongelmia Guelph-permeametrin käytön aikana, ja ongelman aiheuttajaksi epäiltiin hienoaineksen valumista kuoppaan. Kuvassa vasemmalla a) Guelph-permeametrin suodattimen tukkeutuminen, keskellä b) hienoaineksen poistamista kuopasta ja oikealla c) kuopasta poistettua hienoainesta (Kuva Juha Falben).

4.2.2 Site 2 -tutkimusalue

Site 2 -tutkimusalue sijaitsi NP4-rikastushiekka-altaan itäosan pohjalla, jo rakennetun pohjarakenteen vieressä (Kuva 22). Alueen tarkoituksena oli kuvastaa leikattua moreenikerrostumaa, jota oli tiivistetty jyrällä. Ideana oli, että mittaukset tehtäisiin niin läheltä jo valmista tiivistettyä pohjarakennetta, että jyrän tekemä työmäärä olisi vaikuttanut valituilla tutkimuspisteillä. Maastossa jo valmiiksi rakennetun pohjarakenteen ja rakentamattoman pohjan erotti bitumigeomembraani (BGM).



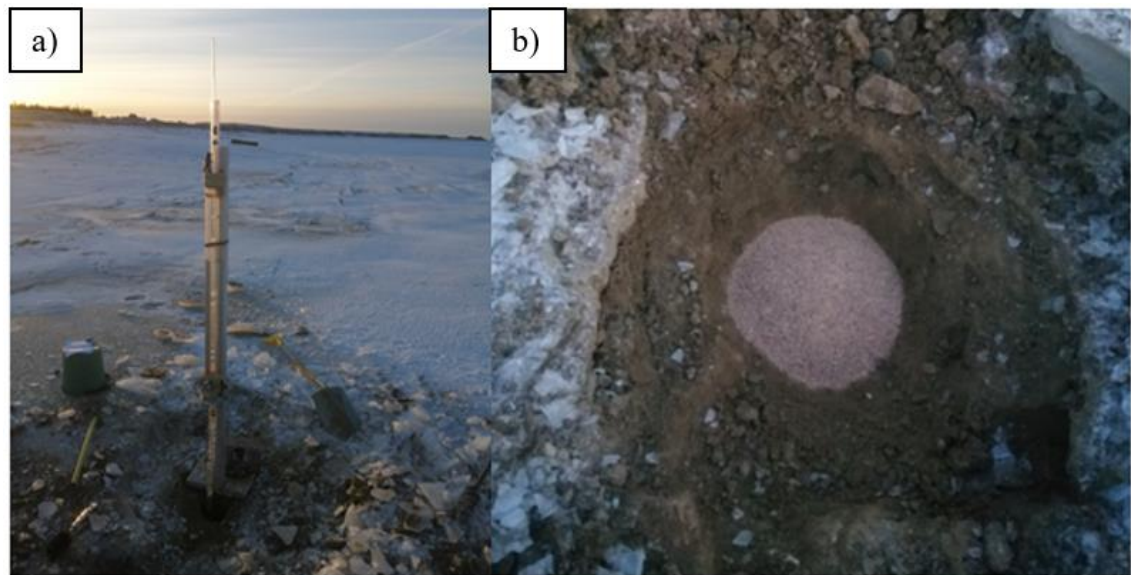
Kuva 22. Tutkimusalue site 2, leikattu ja tiivistetty moreeni (Kuva Juha Falben).

Guelph-permeametri mittaukset sekä volymetrikoe saatiin site 2 alueella tehtyä yhdessä päivässä, mutta näytteenotto jäi seuraavalle päivälle. Mittauspäivänä sää oli aurinkoinen ja lämpötila oli noin -3°C . Mittauspäivää oli edeltänyt usean päivän mittainen pakkaskeli, joka näkyi alueelle kerääntyneiden pintavesien jäätyneenä paksuksi kerrokseksi. Paksu jääkerros hankaloitti mittauspisteiden tekemistä, koska jäätä ei saatu käsivoimin hajalle. Kohdista, joista jääkerros saatiin rikki, paljastui ilmataskuja maanpinnan ja jään välistä. Näissä ilmataskuissa näkyi, että maanpinta oli routunut vain vähän tai ei ollenkaan. Site 2 alueen maaperä oli kivistä ja aiheutti haasteita kairauksien tekemiselle vastaavasti kuin site 1:llä. Pakkasista johtuen, tavoitesyvyytensä alueella oli päästä niin syvälle kuin mahdollista, jotta voitiin varmistaa, että mittaukset tapahtuisivat routarajan alapuolella sulassa maassa. Kairauksien syvyydet, halkaisijat ja etäisyys BGM-kalvosta ovat esitettynä pisteittäin taulukossa 8. Mittauspisteellä 1, joka kairauksissa oli vuorossa viimeisenä, kairan kärki hajosi ja tällä pisteellä johduttiin tyytymään matalampaan syvyyteen.

Taulukko 8. Kairauksien syvyydet, halkaisijat ja etäisyys BGM-kalvosta tutkimuspisteittäin site 2:lla.

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>S2P1</i>	<i>S2P2</i>	<i>S2P3</i>
<i>Päivämäärä</i>	11.11.2020	11.11.2020	11.11.2020
<i>Kairauksen syvyys</i>	27 cm	54 cm	47 cm
<i>Kairareian halkaisija</i>	10 cm	10 cm	10 cm
<i>Etäisyys BGM-kalvosta</i>	6,3 m	1,2 m	3,1 m

Guelph-permeametri mittauksissa tutkimuspisteillä 1 ja 2 oli hieman samaa hienoaainesongelmaa kuten aiemmin esitetyllä site 1 tapauksissa (Kuva 23). Pisteellä 1 mittauksia jouduttiin yrittämään kaksi kertaa ennen onnistumista molemmilla painetasoilla. Pisteellä 2 riitti hienoaineksen poistaminen painetasojen välissä. Tutkimuspisteellä 3 mittaukset onnistuivat hyvin. Volymetrikoe tehtiin tutkimuspisteen 3 vierestä jään alta löytyvään ilmataskuun, josta kaivaminen lapiolla onnistui. Volymetrikokeessa kaivettua maanpintaa oli hieman hankalaa hahmottaa, kuoppaa ympäröivän jääkerroksen takia. Kuvassa 23 on esitetty käynnissä oleva Guelph-permeametri mittaus sekä volymetrikoe site 2 -tutkimusalueella.



Kuva 23. In situ -tutkimusmenetelmiä oikealla a) Guelph-permeametri site 2 -tutkimusalueella ja vasemmalla b) hiekkovolymetrikoe site 2 -tutkimusalueella (Kuva Juha Falben).

Näytteenottoa edeltäneenä yönä lämpötila laski alle -10°C , jonka seurauksena jään alta paljastunut maaperä näytteenottopaikoilla oli jäänyt usean sentin syvyyteen. Tämän vuoksi näytteenotto ei onnistunut enää lapiolla kaivamalla, vaan näytteenottoa avustettiin kaivinkoneella. Näytteet kerättiin mittauspisteiden vierestä silmämääräisesti vajaan metrin syvyydeltä. Kuvassa 24 on esitetty moreenia, josta näyte kerättiin. Troxler-mittaukset alueella suoritettiin kaivinkoneella tehdyistä kuopista.



Kuva 24. Site 2 -tutkimusalueelta kerättyä moreeninäytettä (Kuva Juha Falben).

4.2.3 Site 3 -tutkimusalue

Site 3 -tutkimusalue sijaitsi NP4-rikastushiekka-altaan länsireunassa rakennetun reunapadon päällä. Alueen tarkoituksena oli edustaa rakennettua ja tiivistettyä moreenikerrostumaa, eli padon moreenitiivisterakennetta. Oletuksena alueella oli, että kohteen moreeni olisi huomattavasti tiiviimpää kuin site 2 alueella, johtuen padon rakennustavasta. Reunapatoa rakentaessa, moreenia lisättiin patoon kerroksittain ja kerrosrajojen välissä tapahtui aina erillinen tiivistys jyrällä. Site 3 alue on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Tutkimusalue site 3, rakennettu ja tiivistetty padon tiivistemoreeni (Kuva Juha Falben).

Tutkimukset alueella toteutettiin kolmessa päivässä. Mittaukset suoritettiin ensimmäisenä päivänä tutkimuspisteellä 1, toisena päivänä pisteellä 3 ja kolmantena päivänä pisteellä 2. Toisena päivänä tehtiin volymetrikoe. Tutkimuksia edeltävinä päivinä oli ollut usean päivän mittainen lämmin jakso, jonka aikana oli satanut paljon. Ensimmäisenä ja toisena päivänä esiintyi ajoittaista sadetta, mutta kolmantena tutkimuspäivänä sää oli selkeä. Lämpötila oli jokaisena tutkimuspäivänä muutaman asteen plussan puolella.

Pakkasten jälkeisestä lämpimästä ja sateisesta jaksosta johtuen padon harjan pintakerros oli täysin kyllästynyt vedellä, jonka seurauksena moreeni oli jopa juoksevaa. Velliintynyt pintakerros ulottui noin 5–10 cm syvyyteen, jonka alapuolella oli havaittavissa hieman routaa. Ennen kairauksien ja tutkimuksien aloittamista, velliintynyt pintakerros poistettiin lapiolla. Site 2 alueella rikki menneestä kairankärjestä johtuen, site 3 alueella jouduttiin käyttämään varakärkeä, jonka halkaisija oli 15 cm. Routahavannoista johtuen tavoitesyvyytenä oli päästä niin syvälle kuin mahdollista. Vastaavasti kuten site 1 ja site 2 myös täällä kohdattiin haasteita kairauksien tekemisessä. Tehtyjen kairareikien syvyydet ja halkaisijat ovat esitettynä pisteittäin taulukossa 9. Taulukossa ilmoitettu kairareian syvyys esimerkiksi 10 + 46 cm kuvastaa arviolta poistettua pintakerrosta ja sen jälkeistä kairauksen syvyyttä.

Taulukko 9. Kairauksien syvyydet ja halkaisijat tutkimuspisteittäin site 3:lla. Taulukon kairareian syvyydessä luku 10 + kuvastaa arviolta poistettua pintakerrosta ja sen jälkeinen luku kairauksen syvyyttä.

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>S3P1</i>	<i>S3P2</i>	<i>S3P3</i>
<i>Päivämäärä</i>	16.11.2020	18.11.2020	17.11.2020
<i>Kairauksen syvyys</i>	10 + 46 cm	10 + 41 cm	10 + 43 cm
<i>Kairareian halkaisija</i>	15 cm	15 cm	15 cm

Kuvassa 25 näkyy alueen lisäksi myös käynnissä oleva Guelph-permeametri mittaus. Tutkimuspisteellä 1, kuten aikaisemmillä tutkimusalueilla, mittauksia haittasi hienoaikaisen kerääntyminen kairareikään, jonka takia mittauksia piti yrittää useita kertoja. Tällä pisteellä yksipaine-menetelmästä saatiin tulos, mutta kaksipaine-menetelmä tuntui antavan epäluotettavia tuloksia. Tutkimuspisteellä 2 oli myös hienoaikainen ongelmaa, mutta tällä pisteellä molemmat mittaukset onnistuivat kohtalaisesti. Tutkimuspisteellä 3 yksipaine-menetelmä sujui hyvin, mutta kaksipaine-menetelmässä oli ongelmia hienoaikaisen kanssa. Volymetrikoe onnistui alueella hyvin.

Näytteenotot alueella suoritettiin mittausten yhteydessä. Näytteet kerättiin kairareikien ympäriltä noin 25 cm syvyydeltä, pitäen huolen, että velliintyneet pintakerroksen täysin kyllästynyttä maa-ainesta ei sekoittunut näytteeseen. Troxler-mittaukset alueella tehtiin velliintyneen pintakerroksen alta, jota yritettiin tasata lapiolla isoimmista kivistä ja koloista.

4.3 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriotutkimuksien tavoitteena oli luoda monipuolinen aineisto moreenien erilaisista ominaisuuksista, joita voitaisiin käyttää hahmottamaan kohdealueen moreenien vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä. In situ -tutkimuksissa kerätyille moreeninäytteille tehdyt tutkimukset tutkimuspisteittäin ovat esitettyinä taulukossa 10. Laboratoriokokeet suoritettiin tammikuun ja kesäkuun 2021 välisenä aikana.

Taulukko 10. Tehdyt laboratoriotutkimukset tutkimuspisteittäin.

<i>Tut. piste</i>	<i>Proctor-koe ja vesipitoisuuden määrittäminen</i>	<i>Rakeisuuden määrittäminen (seulonta, areometri ja laserdiffraktio)</i>	<i>Vedenläpäisevyyden ja vedenpidätyskyvyn määrittäminen</i>	<i>Mikroskooppitutkimus</i>
<i>S1P1</i>	x	x	x	
<i>S1P2</i>	x	x	x	
<i>S1P3</i>	x	x	x	x
<i>S2P1</i>	x	x	x	
<i>S2P2</i>	x	x	x	x
<i>S2P3</i>	x	x	x	
<i>S3P1</i>	x	x	x	
<i>S3P2</i>	x	x	x	
<i>S3P3</i>	x	x	x	x

Näytteiden valmistelu ja vesipitoisuus

Vesipitoisuuden määrittäminen tehtiin jokaisen tutkimuspisteen näytteille sekä volymetrikoe näytteille. Näytteitä varastoitiin suljetuissa muovikäpäreissä noin 2 kuukautta ennen tutkimuksen suorittamista. Näytteiden valmistelu ja vesipitoisuuden määrittäminen aloitettiin näytteiden homogenisoinnilla. Ensimmäiseksi valittiin tutkittava tutkimuspiste, jonka näytteitä sekoitettiin käpäreiden sisällä ylösalaisin, jotta kaikki pinnoille kondensoitunut vesi saataisiin mukaan vesipitoisuuden määrittämiseen. Valitun tutkimuspisteen kolme näytesankoa kaadettiin erillisille pelleille, jossa paakkuuntunut moreeniaines rikottiin käsin niin, että noin 32–64 mm rakeet olisivat silmämääräisesti tunnistettavissa. Tämän jälkeen näytteet jaettiin kahdeksaan osaan, jakaen 32–64 mm raekoot näytteisiin tasaisesti (Kuva 26). Tutkittavat osanäytteet ovat määrällisesti melko pieniä, joten esikäsittelyn tavoitteena oli raekoon tasainen jaottelu niin, että kaikki osanäytteet edustaisivat yhtenäistä isoa näytettä.



Kuva 26. Moreeninäytteiden homogenisointi (Kuva Juha Falben).

Homogenisoinnin jälkeen jokaisesta suuresta pelistä valittiin kahdeksasosa näyte, jotka siirrettiin pienemmälle pellille. Näytettä pienemmälle pellille tuli yhteensä noin 5 kg. Sama valmistelu toistettiin jokaisen näytepisteen näytteille lukuun ottamatta volymetrikokeen näytteitä, joissa näytemäärä oli pienempi, siirrettiin se sangon sekoituksen jälkeen suoraan pienemmälle pellille. Kenttäolosuhteissa vallinnut näytteen vesipitoisuus on määritetty näistä näytteistä standardin SFS-EN ISO 17892-1 mukaisesti. Loput suuremmille pelleille jääneistä osanäytteistä siirrettiin isoihin muovipusseihin odottamaan muita tutkimuksia. Pussit suljettiin tiiviisti veden haihtumisen minimoimiseksi.

Pesu- ja kuivaseulonta

Ennen pesuseulontaa uunikuivatetulle näytteelle (105°C) suoritettiin uudestaan homogenisointi, jossa näyte jaettiin pellillä neljään osaan ja isoimmat 32–64 mm rakeet jaettiin osien kesken tasaisesti. Pesuseulontaan näytettä kerättiin pelliltä noin 2,5–3,0 kg. Dispersioaineena liuoksessa käytettiin vedellä laimennettua fairy-puhdistusainetta. Pesuseulonnassa käytetyt seulakoot olivat 1,0 mm ja 0,063 mm. Pesuseulonta suoritettiin runsaan hienoainespitoisuuden vuoksi 2–5 osassa, jotta alempi 0,063 mm seula ei tukkeutuisi. Pesu- ja kuivaseulonta suoritettiin standardin SFS-EN ISO 17892-4 mukaan. Kuvassa 27 on esitetty kokeen päävaiheet.



Kuva 27. Pesuseulonnan päävaiheet a) veden ja dispersioaineen lisäys, b) hienoaineksen huuhtelu seulan läpi, c) näytteiden huuhtelua jatkettiin, kunnes poistuva vesi oli kirkasta ja d) huuhdellut näytteet siirrettiin erilliselle pellille kuivatusta varten (Kuva Juha Falben).

Hienoaineksen pesun jälkeen näyte uunikuivattiin ja punnittiin, minkä jälkeen aloitettiin kuivaseulonta seulakoilla 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0,50, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm. Koska isompia raekokoja näytteissä oli suhteellisen vähän, päätettiin raekoot 64 mm ja 32 mm käydä käsityönä lävitse. Tämä tapahtui siten, että varmistettiin, että kappale läpäisi 64 mm seulan, mutta se ei enää läpäissyt 32 mm seulaa, jonka jälkeen ne punnittiin. Tiedossa oli, että näytteet sisälsivät runsaasti hienoainesta, jonka takia seulonta päätettiin suorittaa

kahdessa vaiheessa raekoille 0,25, 0,125 ja 0,063 mm. Tämä tapahtui siten, että aluksi täryttimessä olleeseen seulatorniin kaadettiin vain puolet näytteestä ja seulonta-ajaksi asetettiin 10 minuuttia. Tämän ajan jälkeen seulat 0,063, 0,125 ja 0,25 mm punnittiin välissä, jonka jälkeen loput näytteestä otettiin mukaan seulontaan ja 10 minuutin seulonta täryttimessä toistettiin. Käytetyiden seulojen halkaisija oli 675 mm, joten standardin SFS-EN ISO 17892-4 mukaan seuloille jäävä enimmäismassa seula-aukon nimelliskokojen mukaan ei saisi ylittää taulukossa 11 esitettyjä määriä.

Taulukko 11. Standardin ISO 17892-4 mukainen suurin seulalle jäävä sallittu massa seulan halkaisijan ollessa 675 mm (mukaillen SFS-EN ISO 17892-4:2016).

<i>Seula-aukon nimelliskoko (mm)</i>	<i>Enimmäismassa seulalla (g)</i>
0,25	112,5
0,125	78,75
0,063	56,25

Standardin SFS-EN ISO 17892-4 mukaan seulontaan tarvittava vähimmäismassa rakeiden D_{90} halkaisijan ollessa 16 mm, seulontaan riittävä vähimmäismassa on 2500 g, mikä tehdyissä seulonnoissa toteutui. Vaikka pienemmille raekoille seulonta toteutettiin kahdessa osassa, standardin mukainen enimmäismassa määrä seulalla ylittyi joissakin tapauksissa. Kuvassa 28 on esitetty kokeen päävaiheet.

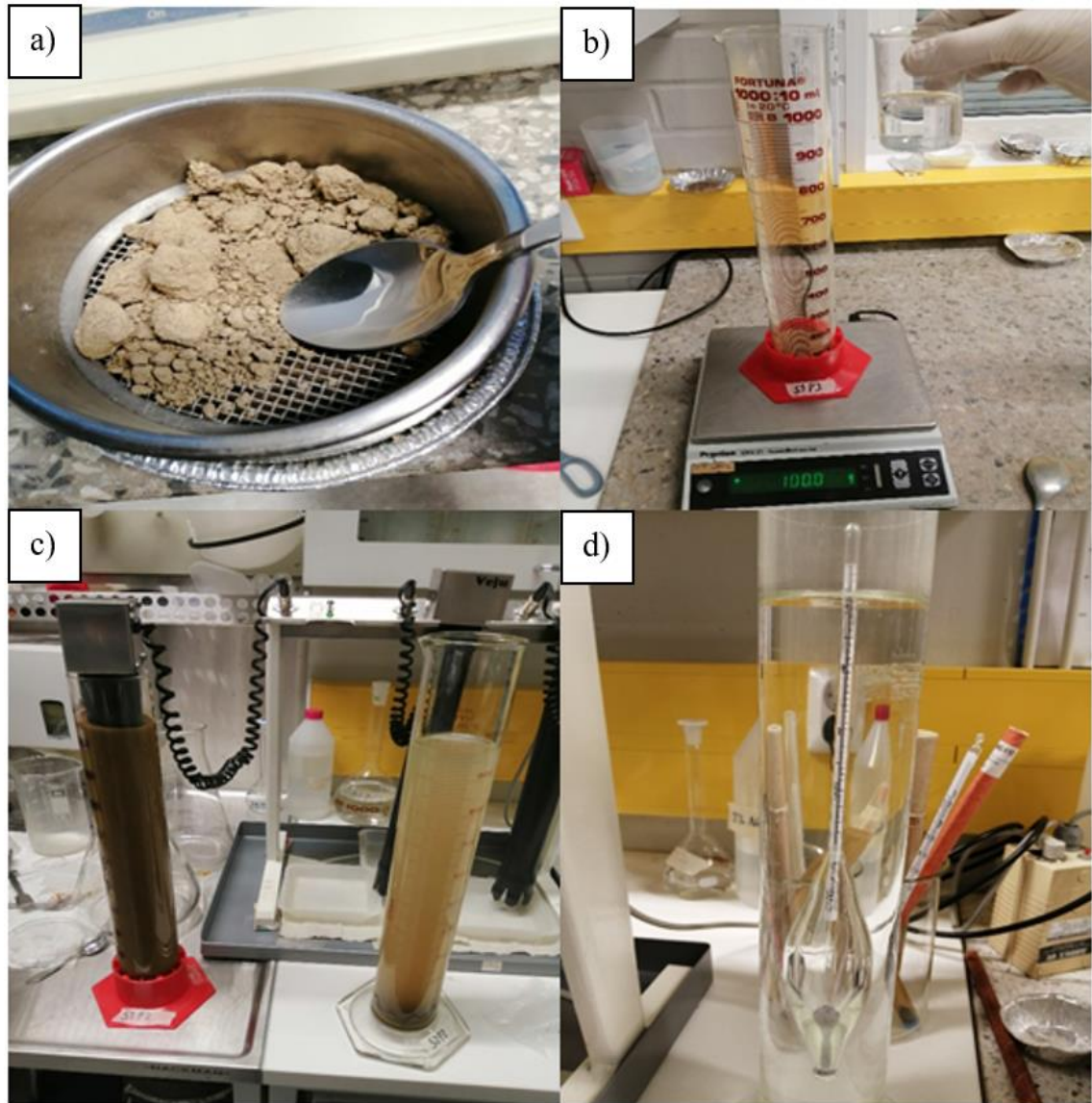


Kuva 28. Kuivaseulonnan päävaiheet a) pesuseulonnan jälkeinen kuivattu näyte, b) yli 32 mm rakeet eroteltiin ja punnittiin käsin, c) 0–32 mm rakeet kaadettiin seulasarjaan, d) seulonnan kesto noin 10 minuuttia, e) 0,063–0,25 mm rakeet seulottiin useammassa erässä ja f) kaikki erilliset raekoot punnittuina ja kerättynä yhteen (Kuva Juha Falben).

Areometrikoe

Areometrikokeessa käytettiin samaa uunikuivattua näytettä kuin seulonnassa. Areometrikokeeseen näytemäärä oli 100 g. Dispersioaineena käytettiin natriumpyrofosfaattia ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) ja mitta-astiana 1000 ml mittalasia, jonka sisähalkaisija oli 6 cm. Punnittu näyte ja dispersioaineliuos sekoitettiin mittalasiin, joka täytettiin noin 990 ml asti tislatussa vedellä. Tämän jälkeen näytettä sekoitettiin sauvasekoittimella noin 30 min. Tämän jälkeen mittalasin yläosa peitettiin haihtumisen estämiseksi ja näytteen annettiin seisoa yksi vuorokausi. Koe aloitettiin sekoittamalla näytettä 30 minuuttia ja kääntelemällä mittalasia ylösalaisin 50 kertaa, jonka jälkeen sekuntikello käynnistettiin. Välittömästi sekoittelun jälkeen mittalasin yläosat huuhdeltiin tislatussa vedellä sinne

tarttuneista partikkeleista niin, että mittalasiin täyttyi 1000 ml mittaviivaan asti. Areometrillä toteutetut mittausajankohdat olivat 2 min, 6 min, 20 min, 1 h, 5 h, 8 h ja 1 vrk. Tämän lisäksi jokaisella mittaushetkellä tarkistettiin liuoksen lämpötila. Areometrin antamasta lukemasta johdetut rakeiden koot ja suhteelliset määrät määritettiin laboratorion nomogrammista, jolle areometri oli kalibroitu. Kuvassa 29 on esitetty kokeen päävaiheet. Areometrikoe suoritettiin GLO-85 geoteknisten laboratorio-ohjeiden mukaan.



Kuva 29. Areometrikokeen päävaiheet a) näytteen seulonta 0–2 mm, b) näytteen ja dispersioaineen lisäys mittalasiin, c) tislatus veden lisäys ja näytteen sekoitus ja d) areometrilukeman ja lämpötilan mittaus eri ajanjaksojen välein (Kuva Juha Falben).

Laserdiffraktio ja mikroskooppitutkimus

Laserdiffraktio ja mikroskooppitutkimus aloitettiin valmistelemalla näyte uunikuivatusta näytteestä. Areometria varten näytteet seulottiin edustamaan 0–2 mm raekokoa, mutta laserdiffraktion ja mikroskooppitutkimuksen osalta päädyimme tutkimaan raekoko väliä 0–0,5 mm eli 0–500 μm . Koska näytteet olivat vesipitoisuuden määrittämisen jälkeen uunikuivatusta maa-aineksesta, esiintyi näytteessä runsaasti hienoaineksen yhteen paakkuuntumista. Pienemmät partikkelit olivat kiinnittyneet toisiinsa ja muodostivat siten suurempia kokonaisuuksia. Tästä syystä näytteet päätettiin erotella hienovaraisesti toisistaan morttelin ja survimen avulla, jotta näyte edustaisi oikeaa raekokojakaumaa (Kuva 30).



Kuva 30. Seulottujen näytteiden esikäsittely survimella ja morttelilla (Kuva Juha Falben).

Käsitellyt näytteet toimitettiin Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikköön, joka toteutti toimeksi annetut laserdiffraktio- ja mikroskooppitutkimukset. Elektronimikroskooppikuvat otettiin kenttäemissolähteellä varustetulla mikroanalysaattorilla (FE-EPMA). Valikoiduista näytteistä otettiin kuvat yhteensä viidestä satunnaisesti valitusta kohdasta kahdella eri suurennuksella, jotka olivat 40- ja 100-kertaiset suurennukset. Valikoidut näytteet olivat S1P3, S2P2 ja S3P3. Kuvien mittakaava on esitetty valkoisen vaakasuoran palkin avulla, joka kuvastaa 100 μm etäisyyttä. Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella mikroskooppikuvista moreenin raemuotoja ja vedenläpäisevyyteen vaikuttavia mineralogisia tekijöitä.

Proctor-koe

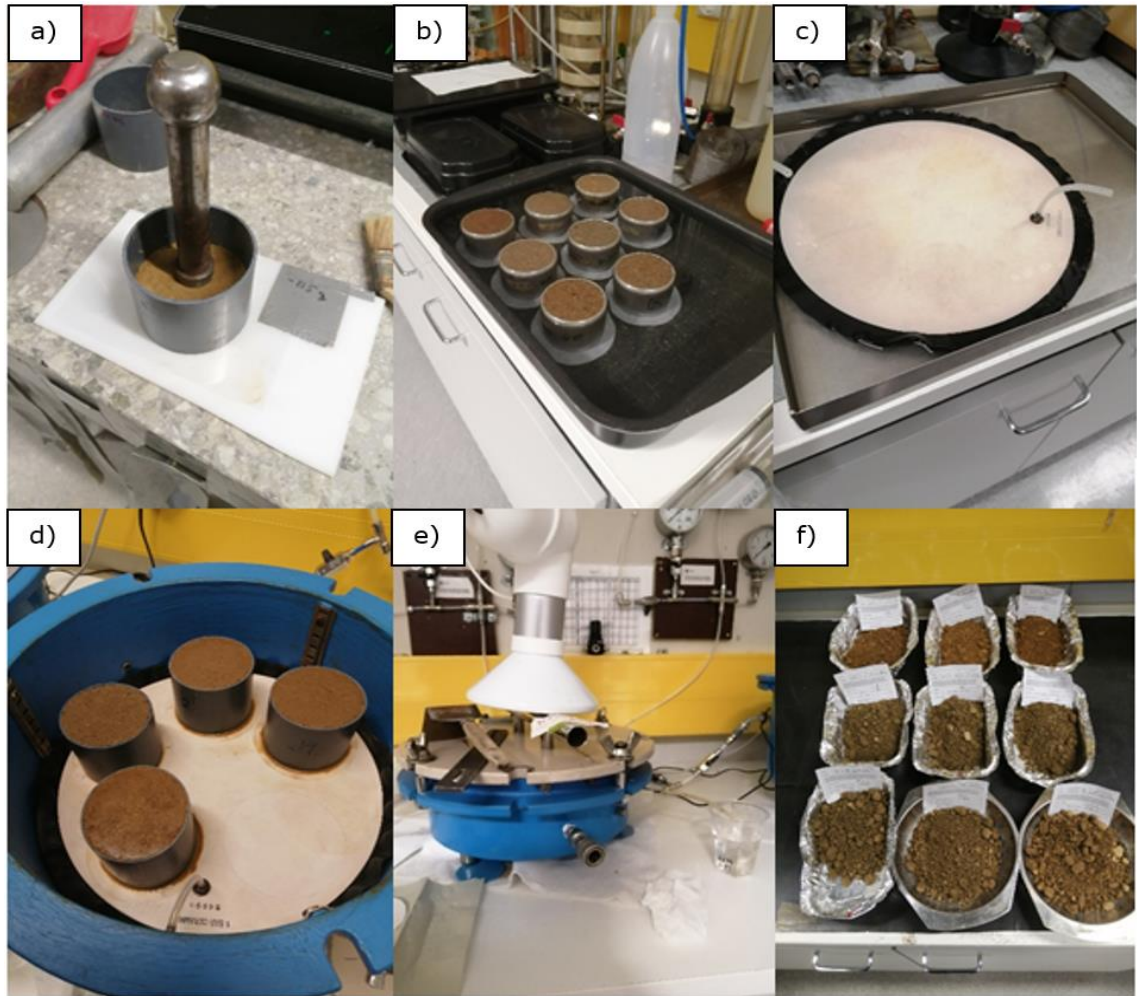
Proctor-koe aloitettiin seulomalla noin 12 kg näytettä 16 mm seulan lävitse. Kivisyysprosentti on laskettu ylisuurten poistettujen rakeiden massasta prosentteina koko massasta. Suurempien raekokojen poistaminen näytteestä lisää näytteen suhteellista kosteutta, mutta tällä ei katsottu olevan merkitystä tuloksen kannalta. Proctor-koe suoritettiin SFS-EN ISO 12386-2 standardin mukaan, poikkeuksena käytetyn sullonta sylinterin tilavuus, joka kokeessa oli $998,5 \text{ cm}^3$ (standardissa noin 943 cm^3) (SFS-EN 13286-2). Tämä otettiin kokeessa huomioon lyöntien määrässä tiivistyskerrosta kohden, joten lyönnejä siis oli 27, 25 sijaan. Lisäksi rakeiden kiintoutumista ei erikseen määritetty vaan laskennassa käytettiin kokemusperäistä arvoa $2,65 \text{ g/cm}^3$ (Rantamäki et al. 1979). Vesipitoisuus määritettiin standardin SFS-EN ISO 17892-1 mukaan. Kuvassa 31 on esitetty kokeen päävaiheet.



Kuva 31. Proctor-kokeen suorittamisen päävaiheet a) seulonta 0–16 mm, b) näytteiden kuivatus/kostutus, c) proctor-sullonta kerroksittain, d) kauluksen irrotus ja näytteen tasaus punnitusta varten, e) tasattu näyte ja f) näytteen keräys kattavasti eri puolilta vesipitoisuuden määrittystä varten (Kuva Juha Falben).

Vedenpidätyskyky

Vedenpidätyskyvyn määrittämistä varten näyte valmistettiin proctor-kokeen tavoin seulomalla näytteitä 16 mm seulan lävitse. Seulotuista näytteistä otettiin osanäyte noin 500 g, kuten aiemmin on esitetty. Halutuksi tiiveysteeksi valikoitu 92 %, eli näytteen kuivatilavuuspainoksi vaadittiin 92 % proctor-kokeessa selvinneestä näytteen maksikuivatilavuuspainosta. Koska oletuksena oli, että näyte olisi hankalaa sulloa 92 % tiiveysasteeseen käsin, näytteitä päätettiin hieman kuivattaa lähemmäs optimivesipitoisuutta, jotta sullonta varmasti onnistuisi. Sullonta-astioiksi, johon näytteiden sullonta tehtiin, valittiin paloja muoviputkea, joiden sisähalkaisija oli noin 7 cm and korkeus noin 6 cm. Sullonta toteutettiin samaan tapaan kuin proctor-kokeessa, mutta pienemmän kokonsa vuoksi vain kolmessa eri kerroksessa sekä kevyemmällä sullontakalustolla kuin proctor-vasaralla. Näytteiden valmistelussa tarkkailtiin, ettei suurempia raekokoja tulisi muoviputken reunaa vasten. Isot rakeet reunoilla aiheuttavat riskin veden kulkeutumiselle reuna pitkin, mikä aiheuttaisi tulosten vääristymistä. Isompia rakeita on jätettävä näytteen keskiosaan, jotta se edustaa oikeaa rakeisuutta. Näytteitä kyllästettiin yön yli. Mitatut paineportaavat kokeessa olivat seuraavat: 1 – 2,1 – 4,5 – 10,1 – 22 – 45 – 95 – 224,5 ja 485 kPa. Kokeen aikana havaittiin, että ensimmäisissä painetasoissa näytteet olivat niin kosteita, että suodatinpaperit niiden alla alkoivat hajota punnitusten yhteydessä, minkä takia suodatinpaperit näytteiden alla päädyttiin tuplaamaan. Myös näytteiden alla oleva huokoskivi piti vaihtaa siirryttäessä 95 kPa:sta 224,5 kPa:han, koska ensimmäinen huokoskivi kesti vain 1 bar:in verran painetta. Kokeen loputtua noin 2 kuukauden jälkeen, näytteille tehtiin vesipitoisuuden määrittäminen lopullisia tulosten laskemisia varten. Putken materiaalin takia näytteitä piti aluksi kuivattaa vain 60°C lämpötilassa, jonka jälkeen näytteiden kutistuessa ne saatiin irrotettua muoviputkista ja kuivatusta pystyttiin jatkamaan 110°C lämpötilassa. Kuvassa 32 on esitetty kokeen päävaiheet. Koe suoritettiin standardin SFS-EN ISO 11274:2019 mukaisesti.



Kuva 32. Vedenpidätyskykykokeen päävaiheet a) näytteiden sullonta haluttuun tiiveyteen, b) näytteiden kyllästys, c) huokoskiven kyllästys, d) näytteet aseteltuna paineselliin, e) pF-laitteisto ja näytteiden punnitseminen painetasojen välissä ja f) viimeisen painetason jälkeinen näytteiden vesipitoisuuden tarkistus (Kuva Juha Falben).

Vedenläpäisevyys muuttuvapainekokeena joustavaseinämaisellä sellillä

Vedenläpäisevyyden mittauksia toteutettiin vakiopainekokeena joustavaseinäisellä sellillä yhteensä 18 kappaletta. Alkuperäisenä tavoitteena oli toteuttaa jokaiselle tutkimuspisteen näytteelle 2 rinnakkaiskoetta, joista toinen suoritettaisiin volymetrikoetta vastaavalla tiiveysasteella ja toinen 92 % tiiveysasteella. Käytännössä joidenkin rinnakkaisnäytteiden tiiveysasteiden erot olisivat niin pieniä, että tiiveyden vaikutusta vedenläpäisevyyteen ei olisi pystynyt havaitsemaan tuloksista. Sen vuoksi näytteiden tiiveysasteissa päädyttiin käyttämään selkeämpiä eroja. Tehtyjen kokeiden tiiveysasteet

vaihtelivat välillä 89–96 %. Käytetyt sellit olivat teräksisiä kokeessa käytettyjen suurien painetasojen vuoksi.

Vedenläpäisykoe aloitettiin proctor-kokeen tavoin seulomalla näytteitä 16 mm seulan lävitse. Näytteiden tiivistämiseen käytettiin samaa koesylinteriä kuin proctor-kokeessa, mutta tällä kertaa näyte tiivistettiin 5 kerroksen sijaan 4 kerroksessa. Kuten aikaisemmissa tiivistyksissä, näytteen valmistuksessa pidettiin huoli, että suurimmat raekoot eivät sijoittuisi reunoille vaan näytteen keskiosiin virtauskanavien ehkäisemiseksi. Koesylinterin tilavuuden ja proctor-kokeessa selvitetyn näytteen maksimikuivatilavuuspainon perusteella, laskettiin tarvittava näytteen massa tavoiteltua tiiveysastetta varten. Laskelmissa käytetyn tilavuuden osalta, näytteen valmiin näytteen tavoitekorkeudeksi asetettiin 109,1 mm. Koesylinterin pohja sekä sisäreuna vuorattiin 1 mm muovikalvolla näytteen kiinnittymisen ehkäisemiseksi tiivistyksen aikana, mikä huomioitiin tilavuudessa. Tiivistystyötä tarkkailtiin siten, että jokaiseen tiivistyskerrokseen tuli saman verran massaa ja kerrosten korkeuden olivat neljäsosan näytteen tavoitekorkeudesta. Tavoiteltua tiiveysastetta vastaavan tarkan tavoitekorkeuden saavuttaminen osoittautui haasteelliseksi, minkä takia näytteen korkeus tarkastettiin sullonnan jälkeen työntömitalla. Todellista korkeutta apuna käyttäen tavoiteltu tiiveysaste korjattiin todelliseen tiiveysasteeseen.

Ensimmäisessä kahdessa näytesarjassa oletuksena oli, että näytteet olisivat hankala sulloa korkeaan tiiveysasteeseen. Sen vuoksi näytteitä päätettiin ilmakeivittää lähemmäs optimivesipitoisuutta, jotta sullonta onnistuisi. Ilmakeivituksen lisäksi näytteissä tiivistäminen toteutettiin proctor-vasaran sijaan survimella. Saatujen tulosten perusteella näytteiden valmistustapaa muutettiin ja kahta näytettä lukuun ottamatta, loput näytesarjojen näytteistä tiivistettiin käyttämällä standardi proctor-vasaraa sekä ilmakeivituksen sijaan näytteitä kostutettiin suurempaan vesipitoisuuteen.

Koe aloitettiin näytteen kyllästämällä. Nesteinä käytettiin tislattua ja keitettyä vettä. Kahdessa ensimmäisessä näytesarjassa näytteet kyllästettiin suoraan takapainetta käyttämällä ja käytetty kyllästysaika oli noin 3 vuorokautta. Ensimmäisten kahden näytesarjan tulokset olivat suurempia kuin oli oletettu ja huomiota kiinnitti erityisesti S2P2 ja S2P3 näytteet. Kokeen aikana näistä näytteistä huuhtoutui hienoaainesta (Kuva 33). Havaintojen perusteella tiivistystapa muutettiin, samoin vesipitoisuutta näytteessä tiivistettäessä sekä kyllästystapaa ja -aikaa.



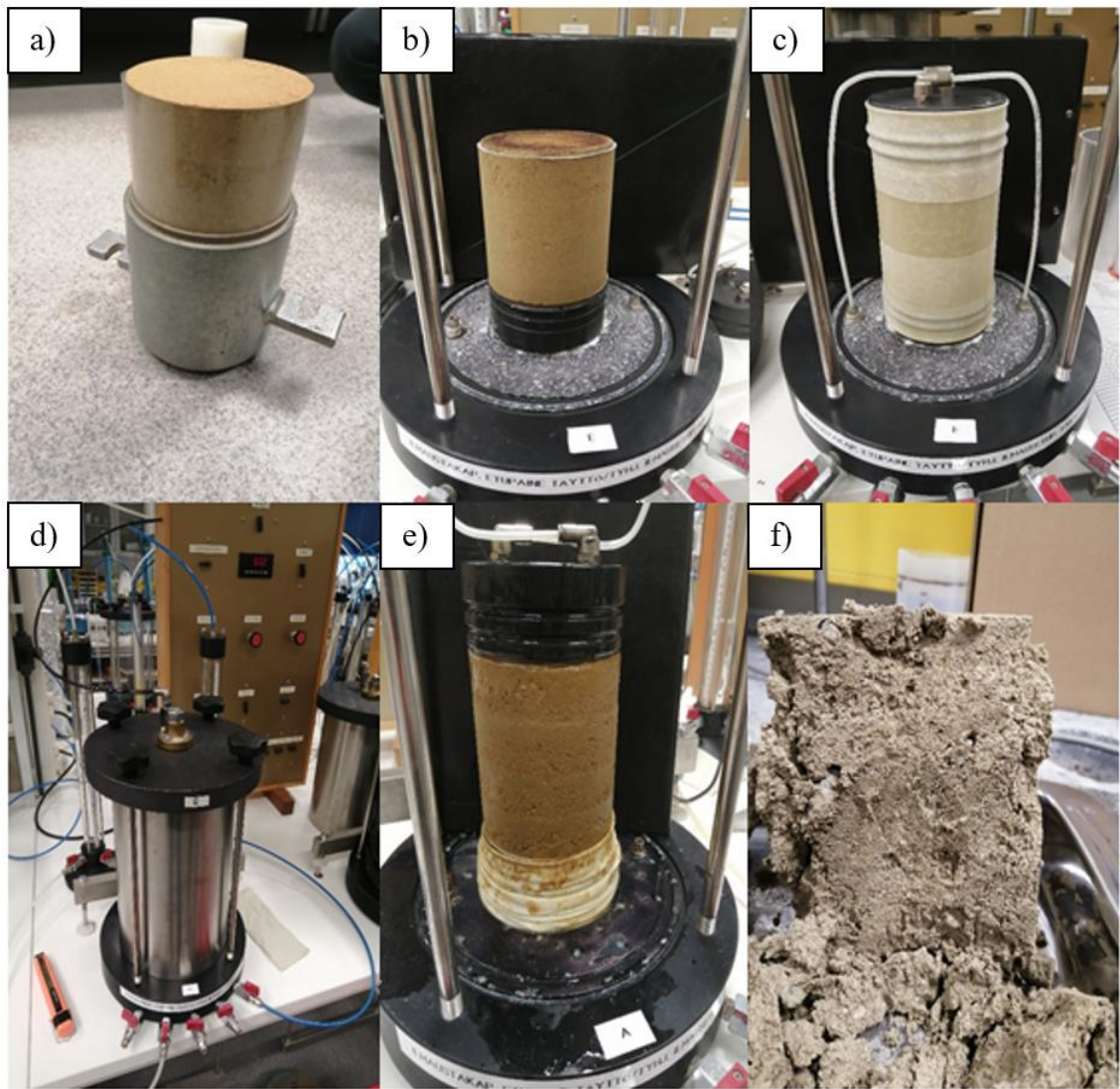
Kuva 33. Hienoaineksen huuhtoutuminen veden mukana (Kuva Juha Falben).

Seuraavissa näytesarjoissa kyllästys tehtiin siis aluksi ilman takapainetta sekä käytetty kyllästysaika oli noin 6 vuorokautta. Kyllästys ilman takapainetta suoritettiin siten, että vettä lisättiin tasaisin väliajoin etubyrettiin, jolloin painegradienttia saatiin nostettua näytteessä hyvin tasaisesti. Tällä tavoin paine-ero ajoi veden virtausta etubyretin korkeammasta paineesta, paineettomaan takabyrettiin. Kokeiden mittauksissa käytetyt painetasot vaihtelivat yksityiskohtaisesti riippuen näytteiden kokeen aikaisista vedenläpäisevyyksien arvoista sekä oletetusta näytteen kestäkyvystä sietää korkeita paineita vaikuttamatta sen rakenteeseen tai mahdollisien virtauskanavien muodostumiseen. Näytteiden yksityiskohtaista vaihtelua lukuun ottamatta tyypillisimmät käytetyt etu-, taka- ja sellipaineiden tasot sekä näiden perusteella laskettu tehokas sellipaine olivat taulukon 12 mukaiset. Vedenläpäisevyyden mittaukset aloitettiin yleensä paineiden ollessa: etupaine 76 kPa, takapaine 75 kPa ja sellipaine 116 kPa. Painetasoja nostessa näytteen annettiin aina tasoittua riittävä aika, ennen seuraavalle painetasolle nostamista tai mittauksen aloittamista. Mittauksissa pyrittiin saamaan aina vähintään 3 peräkkäistä samankaltaista vedenläpäisevyyden tulosta ennen seuraavalle painetasolle nostamista.

Taulukko 12. Tyypillisimmät käytetyt painetasot tutkimuksen vedenläpäisykokeessa.

<i>Etupaine (kPa)</i>	<i>Takapaine (kPa)</i>	<i>Sellipaine (kPa)</i>	<i>Tehokas sellipaine (kPa)</i>
0	0	25	25
25,5	25	50	24,75
50,5	50	80	29,75
75,5	75	116	40,75
76	75	116	40,5
77	75	116	40
104	100	152	50
108	100	154	50
116	100	168	60
128	100	184	70

Kokeen jälkeen näytteen halkaisija ja korkeus tarkistettiin työntömitalla usean mittauksen keskiarvona mahdollisen tiivistymisen tai löyhtymisen varalta, mikä voisi vaikuttaa näytteen kokeen jälkeiseen tiiveysasteeseen. Tämän jälkeen näytteen kokeen jälkeinen vesipitoisuus määritettiin. Kuvassa 34 on esitetty kokeen päävaiheet. Koe suoritettiin standardin ASTM D 5084-90 mukaisesti.



Kuva 34. Vedenläpäisykokeen päävaiheet a) Näyte sullottuna haluttuun tiiveyteen, b) näyte asetettu näytepöydän päälle huokoskivien ja suodatinpaperien väliin, c) joustavaseinäinen kumikalvo, näytehattu ja letkutukset paikoillaan, d) näytteen paineistaminen ja vedenläpäisevyyden mittaaminen, e) kyllästynyt näyte kokeen jälkeen ja f) kuivattun näytteen poikkileikkaus (Kuva Juha Falben).

5 TUTKIMUSTULOKSET

5.1 In situ -tutkimukset

In situ -tutkimukseen kuuluivat vedenläpäisevyyden määrittäminen Guelph-permeametrilla, tiiveyden mittaaminen Troxler-laitteella ja hiekkavolymetrillä sekä vesipitoisuuden mittaaminen Troxler-laitteella. Troxler-mittauksen antamat vesipitoisuus- ja tiiveysastetulokset, volymetrikokeen perusteella laskettu tiiveysasteen tulos sekä Guelph-permeametrilla määritetyt vedenläpäisevyyden tulokset ovat esitettyinä taulukossa 13. Tuloksissa Troxler-mittauksien vesipitoisuuksien vaihteluväli oli 7,5–12,5 % ja tiiveysasteen 80,8–90,9 %. Volymetrikoe tehtiin taulukossa 6 esitettyjen pisteiden läheisyyteen edustamaan koko tutkimusalueiden tiiveysastetta. Volymetrikokeessa tiiveysaste laskettiin kaavojen 15 ja 18 avulla, käyttämällä kentällä mitattua tilavuutta sekä laboratoriossa määritettyä vesipitoisuutta ja proctor-kokeen korjattua maksimikuivatilavuuspainoa. Volymetrikokeen tiiveysasteet olivat site 1 -tutkimusalueelle 88,3 %, site 2 -tutkimusalueelle 92,9 % ja site 3 -tutkimusalueelle 94,3 %. Guelph-permeametrin vedenläpäisevyys laskettiin kohdassa 3.3.1 esitetyllä tavalla käyttämällä yksipaine-menettelmää. Vedenläpäisevyyden tulosten vaihteluväli oli $1,4 \cdot 10^{-7}$ – $4,1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Kaksipaine-menettelmän tuloksia ei esitetty, koska ne onnistuivat huonosti maastossa sekä laskennassa tulokseksi saatiin useita negatiivisia arvoja.

Taulukko 13. Troxler-mittauksilla saadut tutkimuspisteiden vesipitoisuudet (%) ja tiiveysasteet (%), volymetrikokeen perusteella lasketut tiiveysasteet (%) tutkimusalueittain sekä Guelph-permeametrilla yksipaine-menettelmällä lasketut vedenläpäisevyyden tulokset (m/s) tutkimuspisteittäin.

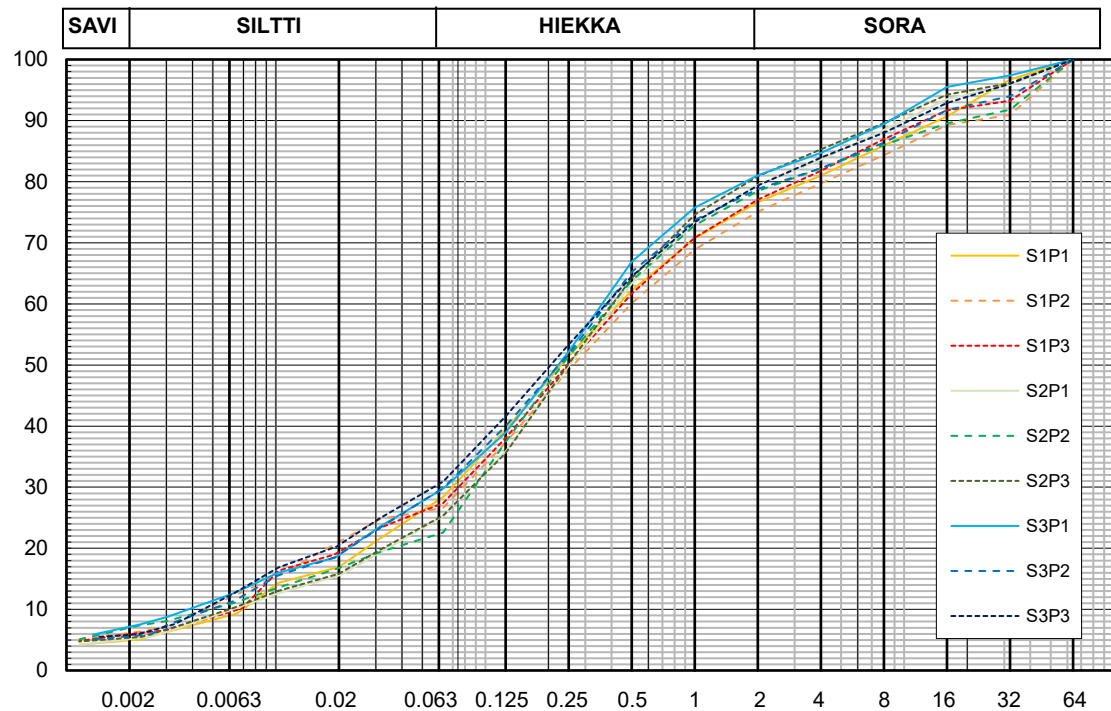
Tutkimuspiste	Vesipitoisuus (Troxler) (%)	Tiiveysaste (Troxler) (%)	Tiiveysaste (hiekkavolymetri) (%)	Guelph-permeametri vedenläpäisevyys (m/s)
S1P1	10,30	83,1		$1,4 \cdot 10^{-7}$
S1P2	10,80	84,7		$7,6 \cdot 10^{-8}$
S1P3	9,60	86,1	88,3	$1,6 \cdot 10^{-7}$
S2P1	9,20	83,3		$7,5 \cdot 10^{-8}$
S2P2	7,50	90,9		$9,6 \cdot 10^{-8}$
S2P3	9,20	84,2	92,9	$4,1 \cdot 10^{-8}$
S3P1	12,50	80,8		$7,6 \cdot 10^{-8}$
S3P2	10,50	88,5		$5,0 \cdot 10^{-8}$
S3P3	9,60	89,1	94,3	$4,8 \cdot 10^{-8}$

5.2 Laboratoriotutkimukset

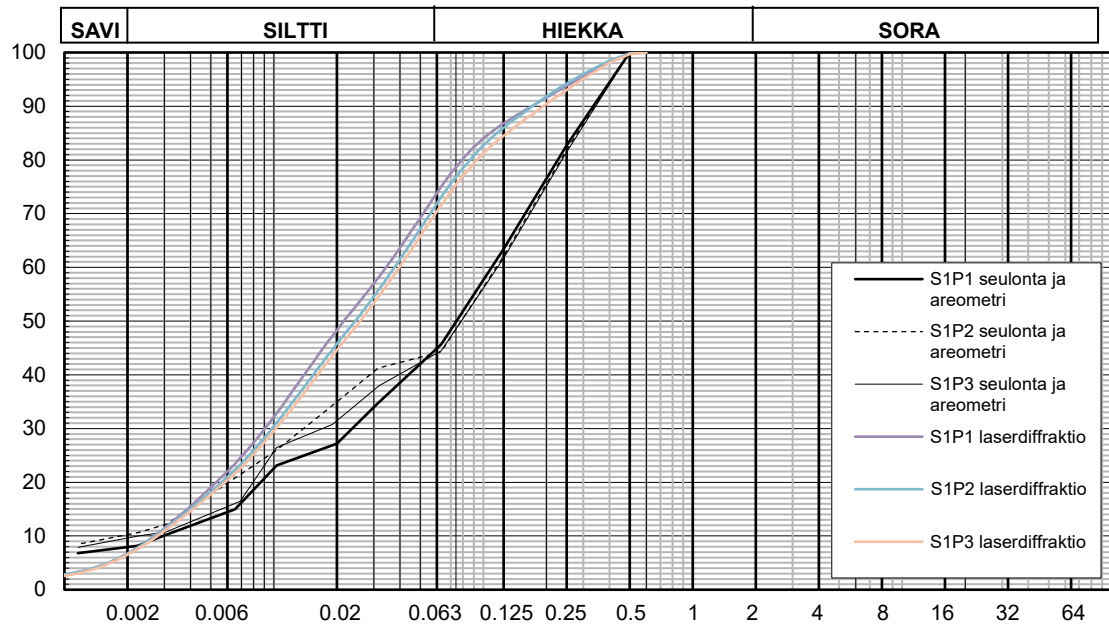
Rakeisuusmääritykset perinteisellä seulonnalla, areometrillä ja laserdiffraktiolla määritettiin kaikille näytteille. Näytteiden nimeämisessä käytettiin GEO-luokitusta. Taulukossa 14 on esitetty näytteiden geoteknisen maalajiluokituksen mukainen maalajinimi, läpäisyprosentteja vastaavat raekoot d10, d50, d60 sekä rakeisuuksissa määritetyt siltin ja saven %-osuudet ja raekokosuhte (d60/d10). Kuvassa 35 on esitetty seulonnalla ja areometrillä määritetyt rakeisuuskäyrät tutkimuspisteittäin. Tämän lisäksi tutkimuspistekohtaiset rakeisuuskäyrät ovat esitetty liitteessä 3. Vaihteluvälit tuloksissa seulonnan ja areometrin mukaan olivat: saviaines 5–7,1 %, hienoaines 22,6–30,9 %, d10 0,0039–0,0069 mm, d50 0,21–0,252 mm, d60 0,38–0,5 mm ja raekokosuhte 65,08–108,70. Kuvissa 36, 37 ja 38 on esitetty laserdiffraktion tulokset rakeisuuskäyrinä site - tutkimusalueittain. Kuviin on lisätty areometrin ja seulonnan tuloksena saadut vastaavat rakeisuuskäyrät. Taulukossa 15 on kuvaajista luetut savi- ja hienoainesprosentit kummallakin tutkimusmenetelmällä. Laserdiffraktion osalta tulokset vaihtelivat saviaineksen osalta 5,5–8,1 % ja hienoaineksen osalta 63,9–73,1 %. Seulonnan ja areometrin osalta tulokset vaihtelivat saviaineksen osalta 8,0–11,0 % ja hienoaineksen osalta 35,4–47,9 %. Kuvassa 39 on esitetty uunikuivattua näytettä jokaiselta tutkimusalueelta, missä vasemmalla on site 1, keskellä site 2 ja oikealla site 3 näytettä. Silmämääräisesti tarkasteltuna site 1 moreeni oli selvästi ruskehtavampaa kuin muilla alueilla. Site 2 ja site 3 moreenit olivat molemmat harmahtavampia. Raemuodossa ei ollut havaittavissa poikkeamia tutkimusalueiden kesken. Silmämääräisesti rakeet olivat pääosin kulmikkaita ja särmikkäitä. Raekoostumuksen osalta site 3 alueella oli havaittavissa enemmän rakeiden yhteen paakkuuntumista kuin muilla alueilla.

Taulukko 14. Tutkimuspistekohtainen geotekninen maalajiluokitus, saven ja hienoaineksen osuudet (%) sekä läpäisyprosentteja vastaavat raekoot d10, d50, d60 (mm) ja raekokosuhte (d60/d10).

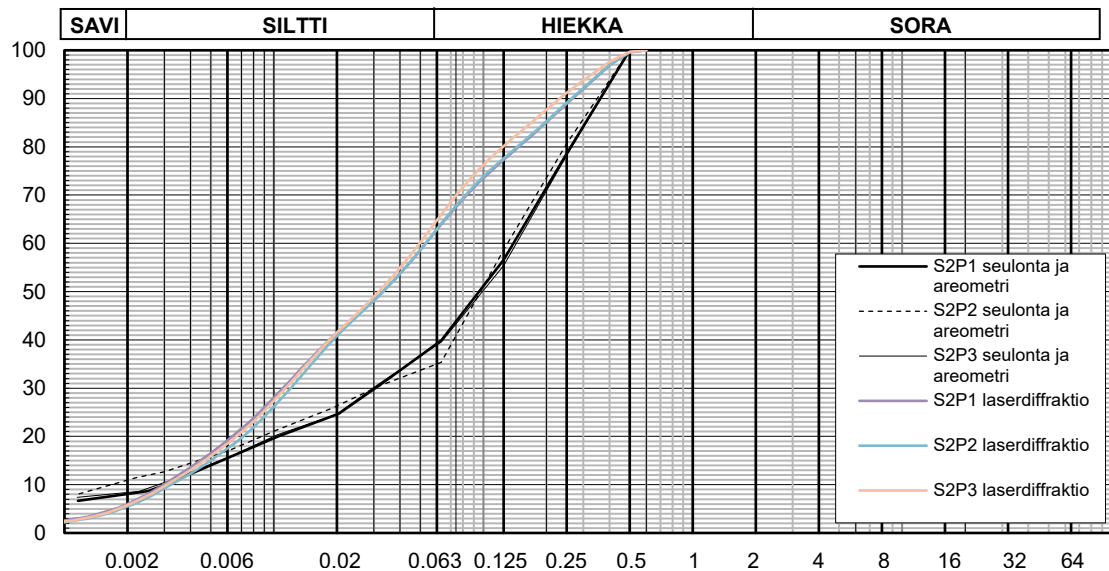
Tut. piste	Maalaji	Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	d60 (mm)	Raekokosuhte (d60/d10)
S1P1	HkMr	5	28,4	0,0069	0,23	0,45	65,22
S1P2	HkMr	6,1	26,6	0,0046	0,252	0,5	108,70
S1P3	HkMr	6	27,4	0,0067	0,24	0,46	68,66
S2P1	HkMr	5	25,2	0,0063	0,25	0,43	68,25
S2P2	HkMr	6,9	22,6	0,0051	0,23	0,41	80,39
S2P3	HkMr	5,1	25,4	0,0063	0,25	0,41	65,08
S3P1	HkMr	7,1	29,7	0,0039	0,23	0,37	94,87
S3P2	HkMr	5,8	29,9	0,005	0,23	0,38	76,00
S3P3	siHkMr	5,9	30,9	0,0045	0,21	0,38	84,44



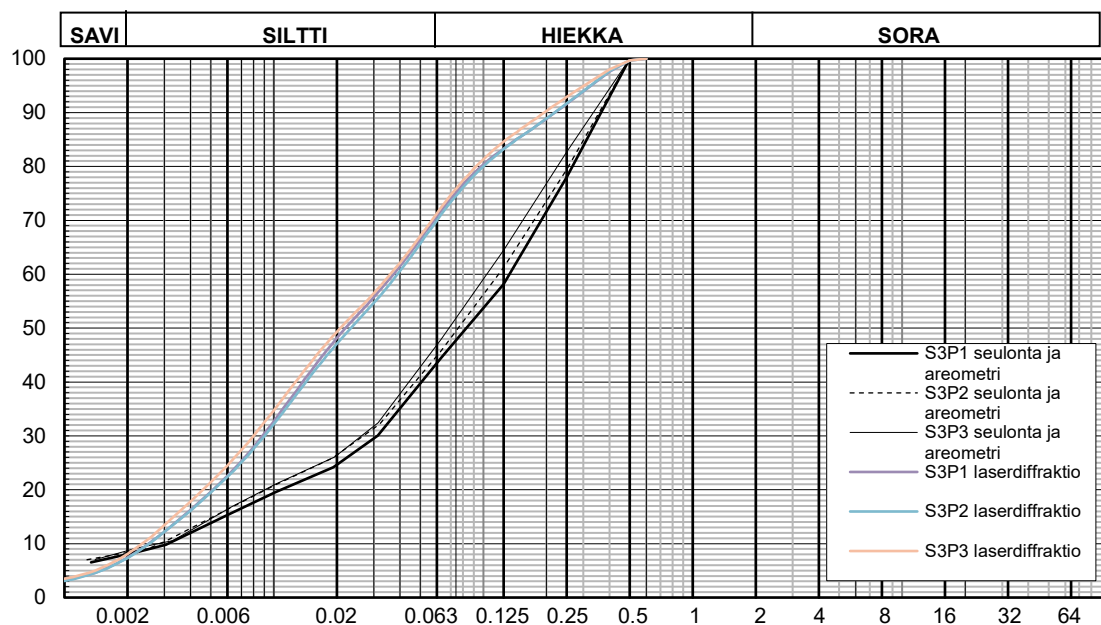
Kuva 35. Seulonnot ja areometrilä määritetyt rakeisuuskäyrät tutkimuspisteittäin, jossa x-akselilla raekoko (mm) ja y-akselilla raekokoa vastaava seulan läpäisyprosentti (%).



Kuva 36. Site 1 laserdiffraktiolla määritetyt rakeisuuskäyrät raekokojakaumalle 0–0,5 mm, jossa x-akselilla raekoko (mm) ja y-akselilla raekokoa vastaava seulan läpäisyprosentti (%). Kuviin on lisätty areometrिन ja seulonnan tuloksena saadut vastaavat rakeisuuskäyrät.



Kuva 37. Site 2 laserdiffraktiolla määritetyt rakeisuuskäyrät raekokojakaumalle 0–0,5 mm, jossa x-akselilla raekoko (mm) ja y-akselilla raekokoa vastaava seulan läpäisyprosentti (%). Kuviin on lisätty areometrिन ja seulonnan tuloksena saadut vastaavat rakeisuuskäyrät.



Kuva 38. Site 3 laserdiffraktiolla määritetyt rakeisuuskäyrät raekokojakaumalle 0–0,5 mm, jossa x-akselilla raekoko (mm) ja y-akselilla raekokoa vastaava seulan läpäisyprosentti (%). Kuviin on lisätty areometrin ja seulonnan tuloksena saadut vastaavat rakeisuuskäyrät.

Taulukko 15. Laserdiffraktion ja seulonnan+areometrin erot savi- ja hienoainesosuudessa raekokovälillä 0–0,5 mm (%).

Tut. Piste	Seulonta+areometri Saviaines (%)	Laserdiffraktio Saviaines (%)	Seulonta+areometri Hienoaines (%)	Laserdiffraktio Hienoaines (%)
S1P1	8,0	6,7	45,7	75
S1P2	10,3	6,7	44,3	73,1
S1P3	9,6	6,5	44,5	71,6
S2P1	8,0	6,0	39,8	63,9
S2P2	11,0	5,5	35,4	64,1
S2P3	8,2	5,8	39,5	66
S3P1	8,0	7,4	44,5	71,8
S3P2	8,2	7,3	45,8	71,1
S3P3	8,7	8,1	47,9	72,4



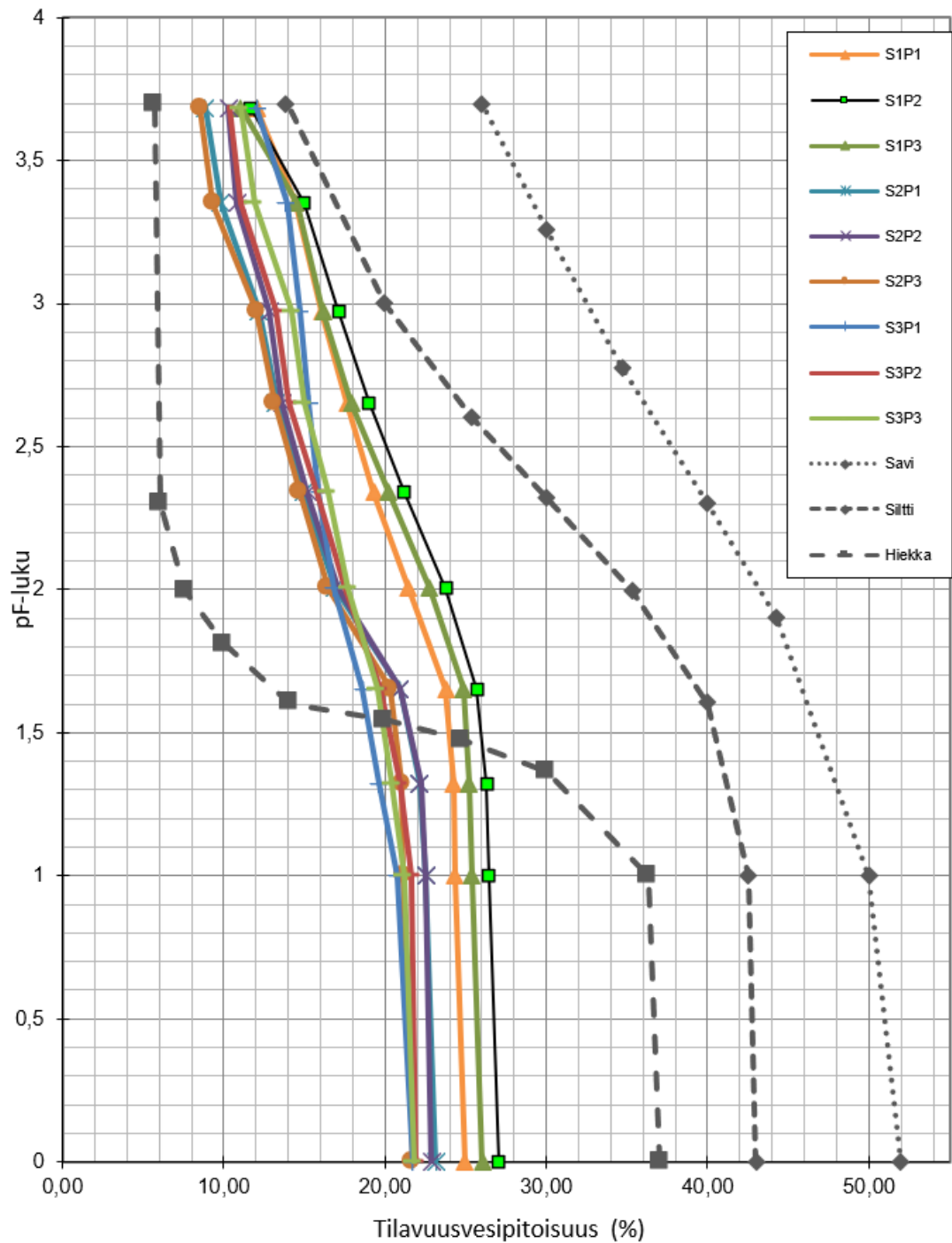
Kuva 39. Uunikuivatetut moreeninäytteet tutkimuspisteiltä S1P3, S2P1 ja S3P1 vasemmalta oikealle (Kuva Juha Falben).

Vesipitoisuuksien tulokset sekä proctor-kokeella määritetyt maksikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet ovat esitetty taulukossa 16. Laboratoriossa mitattujen vesipitoisuuksien vaihteluväli tuloksissa oli 7,45–9,51 %. Proctor-kokeen tulokset ovat määritetty kolmen edustavimman mittaustuloksen kautta piirretystä paraabelin huipusta. Tuloksissa optimivesipitoisuuksien vaihteluväli oli 6,8–7,84 % ja maksimikuivatilavuuspainon 21,41–21,75 kN/m³. Proctor-kokeen kuvaajat ja muu oheistieto on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 16. Laboratoriotutkimuksissa näytteille määritetyt vesipitoisuudet (%) sekä Proctor-kokeen optimivesipitoisuudet (%) ja maksimikuivatilavuuspainot (kN/m³).

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>Vesipitoisuus (%)</i>	<i>Optimivesipitoisuus (%)</i>	<i>Maksimikuivatilavuuspaino (kN/m³)</i>
<i>S1P1</i>	8,86	7,22	21,56
<i>S1P2</i>	8,99	7,38	21,55
<i>S1P3</i>	8,64	7,29	21,71
<i>Site1 volymetri</i>	9,44		
<i>S2P1</i>	7,45	6,90	21,52
<i>S2P2</i>	8,32	7,84	21,41
<i>S2P3</i>	7,50	6,80	21,75
<i>Site2 volymetri</i>	8,17		
<i>S3P1</i>	9,51	7,50	21,68
<i>S3P2</i>	8,83	7,16	21,57
<i>S3P3</i>	9,15	6,87	21,72
<i>Site3 volymetri</i>	8,67		

Kuvassa 40 on esitetty kaikista tutkimuspisteistä vedenpidätyskykykokeessa määritetyt pF-käyrät yhdessä kuvaajassa. Tämän lisäksi kuvaan on lisätty kohdassa 3.4.3 esitetyt tyypilliset vedenpidätyskyvyt savelle, siltille ja hiekalle. Taulukossa 17 on esitetty vedenpidätyskykykokeen tulokset. Tilavuusvesipitoisuus kokeen alussa vaihteli 21,70–27,09 % ja kokeen lopussa 8,56–12,03 %. Tuloksista nähdään, että site 1 leikattu moreeni luovutti eniten vettä kokeen aikana. Toiseksi eniten vettä luovutti site 2 leikattu ja tiivistetty moreeni ja vähinten site 3 padon tiivistemoreeni. Tilavuusvesipitoisuudet kokeen alussa olivat suuruusjärjestyksessä isoimmasta pienimpään site 1, site 2 ja site 3.

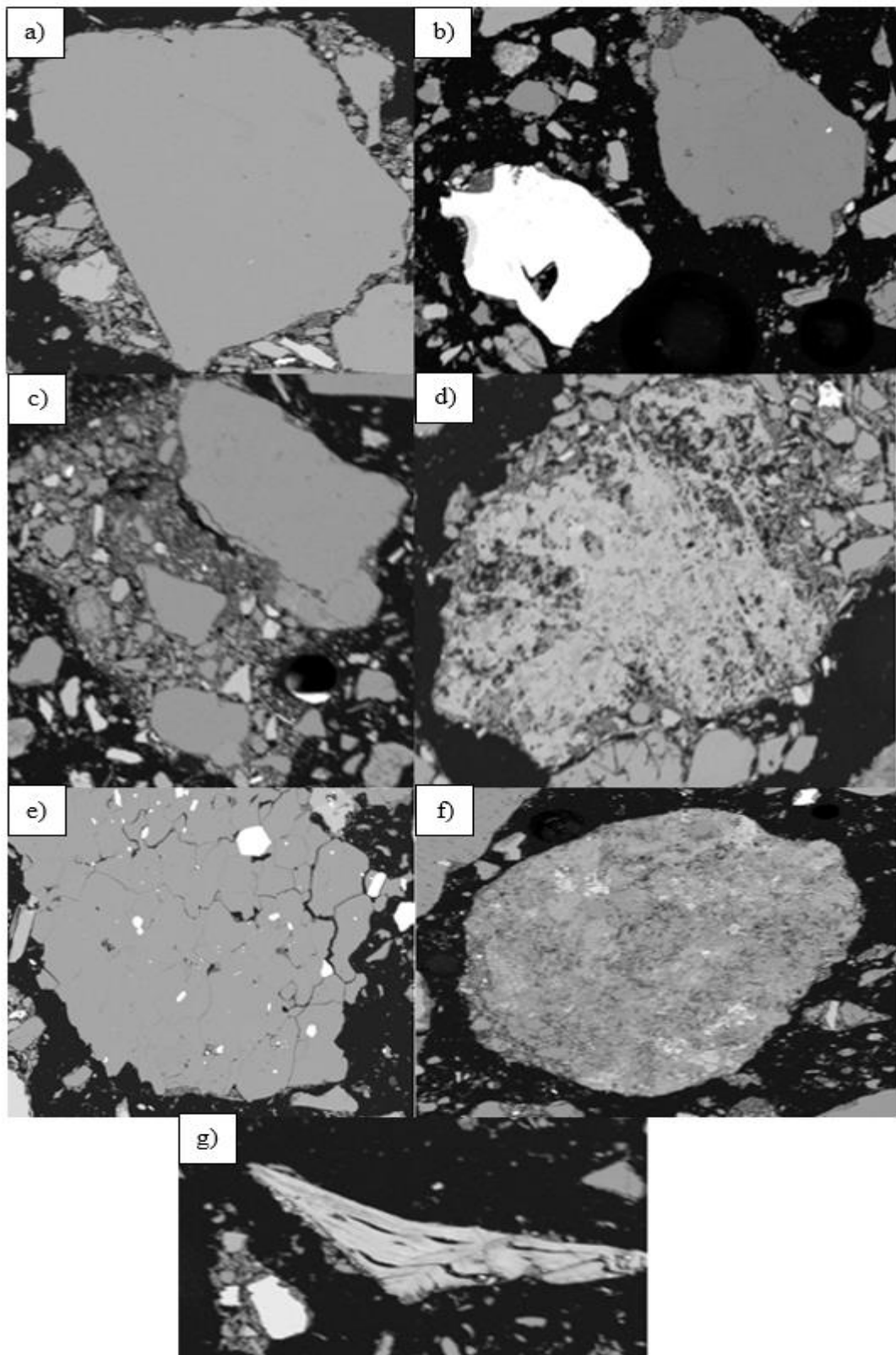


Kuva 40. Moreenien vedenpidätyskykykokeen tulokset tutkimuspisteittäin, jossa x-akselilla tilavuusvesipitoisuus (%) ja y-akselilla pF-luku. Vertailukohdaksi kuvaan on lisätty harmailla katkoviivoilla tyypillisten saven, siltin ja hiekan vedenpidätyskyky. (mukaillen Tuller & Or 2004)

Taulukko 17. Vedenpidätyskykykokeen tilavuusvesipitoisuudet kokeen alussa ja lopussa.

<i>Tut. piste</i>	<i>Tilavuusvesipitoisuus kokeen alussa (%)</i>	<i>Tilavuusvesipitoisuus kokeen lopussa (%)</i>
<i>S1P1</i>	24,99	12,03
<i>S1P2</i>	27,09	11,68
<i>S1P3</i>	26,03	11,02
<i>S2P1</i>	22,88	10,30
<i>S2P2</i>	23,10	8,90
<i>S2P3</i>	21,70	8,56
<i>S3P1</i>	21,72	11,98
<i>S3P2</i>	21,93	10,33
<i>S3P3</i>	21,78	11,08

Elektromikroskooppikuvista tehdyt havainnot olivat suurimmaksi osaksi kuvassa 41 vasemmalla ylhäällä (a) kaltaisia kiinteitä partikkeleita, missä niiden tasainen pinta kertoo partikkelin kiinteydestä. Tällaisen partikkelin läpi ei suotautumista tapahdu, joten ne eivät kasvata vedenläpäisevyyttä. Kuvassa oikealla ylhäällä (b) esiintyvistä partikkeleista kirkkaampi koostuu raskaammista ja tummempi kevyemmistä alkuaineista. Partikkelit olivat pääosin tummemman sävyisiä. Musta osuus partikkelien välissä on tyhjää tilaa. Useimpien partikkelien reunoilla ja väleissä on nähtävissä vasemmalla keskellä (c) mukaista epämääräistä epätasaisuutta, joka koostuu hyvin hienosta pölymäisestä aineksesta. Kyseessä ei siis ole yksittäinen partikkeli, vaan hyvin hieno aines agglomeroituu isompien partikkelien ympärille näytteen valmistuksen yhteydessä. Kuvassa oikealla keskellä (d) taas nähdään huokoinen partikkeli. Tällaisen partikkelin läpi tapahtuu suotautumista, joten ne kasvattavat vedenläpäisevyyttä. Kuvassa vasemmalla alhaalla (e) ei ole kyse partikkelin halkeilusta tai huokoisuudesta, vaan kuvassa nähdään erillisten partikkelien paakkuuntumista toisiinsa kiinni. Vasemmalla alhaalla (f) nähdään rapautunut partikkeli ja aivan alimmaisena (g) partikkeli on silikaatteihin kuuluva kiillemineraali. kiillemineraalit kasvattavat vedenläpäisevyyttä. Rakeet olivat pääsääntöisesti kulmikkaita ja särmikkäitä sekä pieneltä osin pitkulaisia ja pyöristyneitä.



Kuva 41. Elektromikroskooppikuvien havaintoja, jossa a) kiinteä partikkeli, b) partikkelien alkuainekoostumukset erilaiset, c) agglomeraatiota partikkelin ympärillä, d) huokoinen partikkeli, e) partikkelien yhteen paakkuuntuminen, f) rapautunut partikkeli ja g) kiillemineraaleista koostuva partikkeli.

Vedenläpäisevyyden tulokset vaihtelivat näytteen valmistustavasta riippuen, joten tulokset on esitetty kahdessa kategoriassa: ilmakeivattut näytteet ja kostutettut näytteet. Vedenläpäisevyyden tulokset ovat esitetty taulukossa 18. Kaikki vedenläpäisevyydet on ilmoitettu 20°C lämpötilassa. Vedenläpäisevyysskoikeissa määritetyt tulokset ilmakeivattujen näytteiden osalta vaihtelivat $1,00 \cdot 10^{-6}$ – $2,40 \cdot 10^{-8}$ m/s väliltä ja kostutettujen näytteiden osalta $4,20 \cdot 10^{-8}$ – $2,20 \cdot 10^{-10}$ m/s väliltä, kun yksi selkeästi kostutetuissa näytteistä saatu poikkeava tulos jätetään huomioimatta (S2P2). Yksityiskohtaisemmat vedenläpäisevyyden tulokset ovat esitetty liitteessä 4, missä esitellään esimerkiksi kyllästys- ja tiiveysasteet sekä painetasot ja muu oheistieto.

Taulukko 18. Vedenläpäisevyydetulokset jaettuna näytteiden valmistustavan mukaan ilmakeivattuihin ja kostutettuihin näytteisiin (m/s).

<i>Tutkimuspiste</i>	<i>Vedenläpäisevyys (ilmakeivattu) (m/s)</i>	<i>Vedenläpäisevyys (kostutettu) (m/s)</i>
<i>S1P1</i>	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$2,80 \cdot 10^{-9}$
<i>S1P2</i>	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$2,40 \cdot 10^{-8}$
<i>S1P3</i>	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$4,20 \cdot 10^{-8}$
<i>S2P1</i>	$3,20 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-9}$
<i>S2P2</i>	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-7} / 8,10 \cdot 10^{-10}$
<i>S2P3</i>	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$9,20 \cdot 10^{-10}$
<i>S3P1</i>	$2,40 \cdot 10^{-8}$	$6,30 \cdot 10^{-10}$
<i>S3P2</i>	$3,30 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
<i>S3P3</i>	-	$2,20 \cdot 10^{-10}$

Moreenin vedenläpäisevyyttä arvioitiin 6 erilaisella empiirisellä laskentayhtälöllä (Taulukko 19). Osassa niistä Breyer, Hazen, Slitcher ja USBR, oli reunaehdot, joita näytteet eivät täyttäneet. Rikkoutuneet reunaehdot olivat raekokosuhte ja tehokasraekoko. Odongin (2008) ja Blohmin (2016) mukaan menetelmät ovat kuitenkin olleet sovellettavissa, vaikka reunaehdot ei ole täytetty. Tämän perusteella kaikki tulokset otettiin tarkasteluun mukaan reunaehtojen rikkoutumisesta huolimatta. Kozeny-Carmanin ja Terzagin laskentayhtälöissä reunaehdot ei rikkoutunut. Tiiveysasteiden vaihteluista johtuen näytteille määritettiin erilliset huokoisuuden arvot kaavan 3 avulla käyttäen laboratorion vedenläpäisevyysskoikeen jälkeistä kuivatilavuuspainoa. Terzaghin yhtälössä käytettiin lajittuneisuusasteelle arvoa 0,0084. Laskentamenetelmien tulokset ovat esitetty liitteessä 5. Liitteeseen on lisätty vertailukohdaksi tässä työssä määritetyt vedenläpäisevyyden arvot Guelph-permeametrilla ja muuttavapainekokeena

joustavaseinäisessä sellissä. Laskentamenetelmien osalta tulokset vaihtelivat kaikkien moreeninäytteiden kesken: Breyer $2,5 \cdot 10^{-7}$ – $6,4 \cdot 10^{-8}$ m/s, Kozeny-Carman $1,3 \cdot 10^{-7}$ – $1,6 \cdot 10^{-8}$ m/s, Hazen $2,9 \cdot 10^{-7}$ – $3,9 \cdot 10^{-8}$ m/s, Slitcher $5,9 \cdot 10^{-8}$ – $7,9 \cdot 10^{-9}$ m/s, Terzaghi $8,8 \cdot 10^{-8}$ – $7,8 \cdot 10^{-9}$ m/s ja USBR $2,4 \cdot 10^{-6}$ – $4,9 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Taulukko 19. Empiirisillä laskentayhtälöillä arvioidut moreenien vedenläpäisevyydet kaikkien moreeninäytteiden kesken (m/s).

<i>Empiirinen laskentayhtälö</i>	<i>Moreenin arvioitu vedenläpäisevyys (m/s)</i>
<i>Breyer</i>	$2,5 \cdot 10^{-7}$ – $6,4 \cdot 10^{-8}$
<i>Kozeny-Carman</i>	$1,3 \cdot 10^{-7}$ – $1,6 \cdot 10^{-8}$
<i>Hazen</i>	$2,9 \cdot 10^{-7}$ – $3,9 \cdot 10^{-8}$
<i>Slitcher</i>	$5,9 \cdot 10^{-8}$ – $7,9 \cdot 10^{-9}$
<i>Terzaghi</i>	$8,8 \cdot 10^{-8}$ – $7,8 \cdot 10^{-9}$
<i>USBR</i>	$2,4 \cdot 10^{-6}$ – $4,9 \cdot 10^{-7}$

5.3 Muualla tehdyt tutkimukset

Tutkimuksessa hyödynnettiin alueelta aiemmin tai tutkimuksen aikana muualla laboratorioanalyysihin lähetettyjen näytteiden tuloksia tai kentällä tehtyjä in situ –mittauksia. Muualla tehtyjen tutkimusten tulokset ovat esitetty liitteessä 6. In situ vedenläpäisevyys tutkimuksia oli tehty aiemmin Guelph-permeametrillä ja double ring -infiltrometrillä, jotka tehtiin kahdessa eri osassa. Toisessa osiossa vedenläpäisevyyden lisäksi arvioitiin maan tiiveys Troxler-laitteella, jotka on lisätty tuloksiin. Guelph-permeametrin vedenläpäisevyyden tulos on määritetty yksipaine-menetelmää käyttämällä. Laboratorio tutkimuksia otettiin mukaan yhteensä neljästä eri laboratoriosta. Analyysijä saatiin rakeisuudesta, proctor-kokeista ja kolmella eri menetelmällä tehdyistä vedenläpäisevyys tutkimuksista. Vedenläpäisevyyskokeet tehtiin laboratoriossa 1 (LAB1) muuttavapaineisena jäykkäseinäisessä sellissä, laboratoriossa 2 (LAB2) ja 3 (LAB3) muuttavapaineisena joustavaseinäisessä sellissä ja laboratoriossa 4 (LAB4) vakioapaineisena joustavaseinäisessä sellissä. Laboratorioissa vedenläpäisevyyskokeiden tulokset vaihtelivat laboratorio 1 osalta $3,9 \cdot 10^{-7}$ – $4,4 \cdot 10^{-10}$ m/s, laboratorio 2 osalta $9,6 \cdot 10^{-8}$ – $3,2 \cdot 10^{-8}$ m/s, laboratorio 3 osalta $5,4 \cdot 10^{-7}$ – $3,3 \cdot 10^{-10}$ m/s ja laboratorio 4 osalta $2,8 \cdot 10^{-9}$ – $1,1 \cdot 10^{-9}$ m/s. In situ -tutkimuksissa mitattujen vedenläpäisevyys tulosten vaihteluväli Guelph-permeametrin osalta oli $3,7 \cdot 10^{-7}$ – $6,3 \cdot 10^{-9}$ m/s ja double ring -infiltrimetrin osalta $4,9 \cdot 10^{-6}$ – $4,8 \cdot 10^{-8}$ m/s.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä osiossa pohditaan kohdealueen moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä sekä pyritään vastaamaan kysymyksiin, miten ja miksi ne vaikuttavat vedenläpäisevyyteen. Osiossa vertaillaan tässä diplomityössä saatuja tuloksia, jotka ovat lyhennetty JF sekä muualla tehtyjä laboratoriotutkimuksissa saatuja tuloksia, jotka ovat lyhennetty LAB1, LAB2, LAB3 ja LAB4 (Kohta 5.2 ja kohdan 5.3 liite 6). Kappaleessa 4.3 esitettiin omien JF kokeiden suorittamisen aikana tehtyjä muutoksia testaamiseen, minkä vuoksi tuloksia verrataan kahdessa eri osassa (ilmakuivatetut ja kostutetut näytteet). Muiden tutkimusten yhteydessä tehtyjä in situ -tutkimuksia tarkastellessa ilmoitetaan tekstissä erikseen. Tuloksia on mahdollisuuksien mukaan tulkittu tilastollisesti regressioanalyysin avulla ja muuttujia on selitetty R^2 -luvun avulla. Mikäli jostain tutkimusmenetelmästä ei ollut tarpeeksi mittaustuloksia, ei analyysia ole voitu tehdä, esimerkiksi LAB4-tulokset. R^2 -luku voi vaihdella välillä 0...1 ja se selittää muuttujien välistä riippuvuutta. Mikäli R^2 -luku on 1, on muuttujien välinen riippuvuussuhde täysin selitettävissä ja ennustettavissa. Tässä työssä R^2 -lukua oleellisempi mittari on trendiviiva, joka selittää muuttujan suuruuden vaikutusta vedenläpäisevyyttä suurentavana tai pienentävänä tekijänä. Esimerkiksi viivan laskiessa oikealle alaspäin vedenläpäisevyys pienenee muuttujan kasvaessa ja suurenee muuttujan pienentyessä. Mikäli viiva on vaakasuora, ei muuttujalla ole tulosten mukaan vaikutusta vedenläpäisevyyteen.

6.1 Rakeisuuteen perustuva vedenläpäisevyyden arviointi

Moreenin vedenläpäisevyyttä arvioitiin 6 erilaisella empiirisellä laskentayhtälöllä (Kohta 5.2 ja liite 5). Yleisesti ottaen lasketut tulokset vaihtelevat huomattavasti, eivätkä ne anna alle $1 \cdot 10^{-8}$ m/s vedenläpäisevyyksiä, lukuun ottamatta Slitcherin ja Terzaghin yhtälöitä. Tämä viittaa siihen, että menetelmät eivät ole kovin soveltuvia verratessa laboratorio-olosuhteissa tehtyihin moreenin vedenläpäisevyyden mittauksiin, joiden mukaan vedenläpäisevyys voi olla hyvin pieni. Verratessa empiirisillä laskentakaavoilla saatuja tuloksia in situ- ja laboratoriotuloksiin, havaitaan että tulokset ovat samaa suuruusluokkaa lukuun ottamatta laskentayhtälöiden Breyerin ja USBR:n tuloksia. Pienimmät vedenläpäisevyydet olivat site 3 alueella ja isoimmat site 1:llä.

Kostutettujen näytteiden osalta Terzaghin-yhtälön tulokset näyttävät olevan lähimpänä kostutetuista laboratorionäytteistä mitattuja arvoja, vaikka yhtä pieniin vedenläpäisytuloksiin ei tämän laskentamenetelmän osalta päästy. Tätä tukee myös se, että menetelmä soveltuu suurirakeisille hiekoille, eikä sille ole asetettu reunaehtoja, jotka mitätöisivät tulokset. Muokkaamalla yhtälön lajittuneisuusastetta (C), tuloksissa olisi mahdollista päästä vielä lähemmäksi kostutettujen näytteiden tuloksia. Ilmakuivattujen ja in situ -tulosten osalta Breyerin menetelmällä nähdään olevan hieman vastaavuutta tulosten osalta, mutta suurimmaksi osaksi nämä tulokset heittelevät mitatuista arvoista. Samoin USBR-yhtälön tulokset aliarvioivat huomattavasti lähes kaikkia mitattuja arvoja. Näitä kahta menetelmää yhdistää se, että ne eivät huomioi ollenkaan huokoisuustekijää. Huokoisuuden poistaminen yhtälöstä näyttää vaikuttavan negatiivisesti tulosten tarkkuuteen, minkä takia nämä yhtälöt eivät näytä soveltuvan kohdealueen moreenille. Ilmakuivattujen näytteiden osalta parhaiten tulosten kanssa korreloi Hazenin menetelmä. In situ -tulosten osalta useampi menetelmä, joko yliarvioi tai aliarvioi mitattuja tuloksia. Tarkimmaksi laskentamenetelmäksi näiden osalta osoittautui Kozeny-Carman.

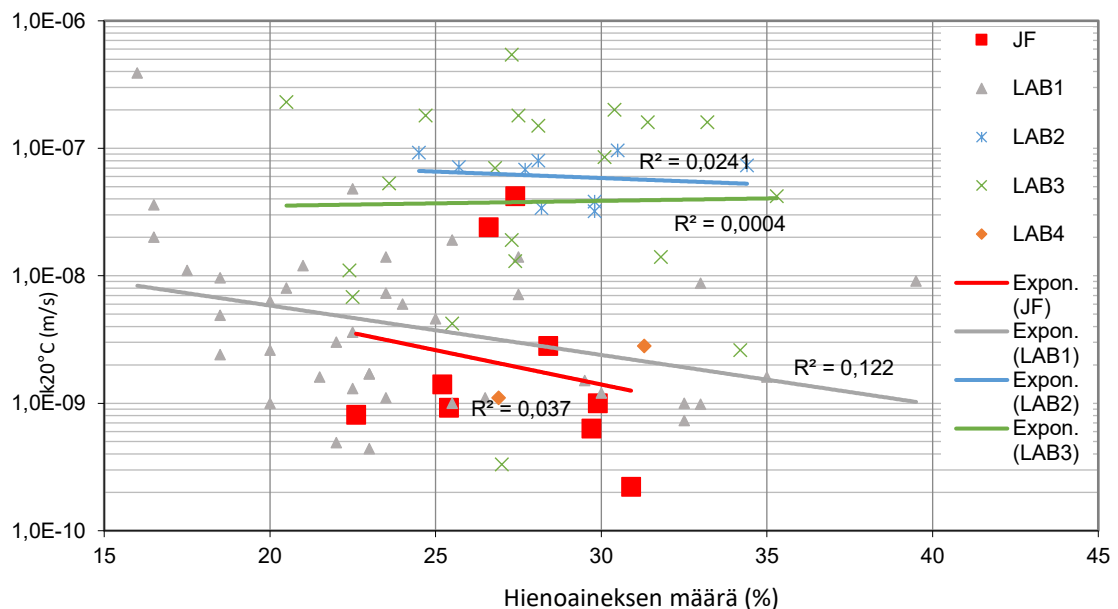
6.2 Moreenin silmämääräiset ja mikroskooppiset havainnot

Tutkimusalueiden moreeninäytteet tarkasteltiin silmämääräisesti ulkonäön sekä tarkemmin elektromikroskooppikuvien perusteella. Topografisesti kohdealue on laaja alue, jossa on paljon korkeusvaihteluja, minkä seurauksena jääkauden aikana siellä on syntynyt monenlaisia erilaisia moreeneja. Site 1 alueen moreeni erosi silmämääräisesti arvioituna värin perusteella muiden site-tutkimusalueiden moreeneista. Mikroskooppitutkimuksessa ei tutkimusalueiden moreenien välillä havaittu poikkeavuuksia. Site 1 moreenin ruskea väri saattaa johtua esimerkiksi hapettuneista rautamineraaleista. Site 3 moreenin partikkelien paakkuuntuneisuus johtuu todennäköisesti näytteenotto hetkellä vallinneesta kosteammasta säästä, jonka seurauksena se paakkuuntui kuivuessaan. Elektromikroskooppikuvista ei havaittu mitään moreenin vedenläpäisevyyteen merkittävästi vaikuttavaa mineralogista tekijää. Kuvista vedenläpäisevyyttä kasvattavia kiillemineraaleja ja huokoisia partikkeleja havaittiin vain pari kappaletta. Kuitenkin site 1 kostutetut näytteet saivat keskimäärin paljon suurempia vedenläpäisevyyksiä kuin site 2 ja 3 moreenit. Koska moreeneille ei tehty tarkempaa mineralogisen koostumuksen tutkimusta ja ainoa ulkonäöllinen vedenläpäisevyyteen

korreloiva tekijä on moreenien väriero, niin mineralogisten tekijöiden vaikutusta vedenläpäisevyyteen ei voida poissulkea kokonaan.

6.3 Hienoaineoksen osuuden ja raekokosuhteen vaikutus vedenläpäisevyyteen

Hienoaineoksen määrän tiedetään yleensä pienentävän materiaalin vedenläpäisevyyttä. Kuvassa 42 on esitettyä moreenin hienoaineosuuden tulokset suhteessa laboratoriossa määritettyihin vedenläpäisevyyden tuloksiin. Hienoaineoksen analyysissä ovat mukana vedenläpäisevyydet JF-näytteistä, joita ei ole ilmakeivattu sekä LAB1-3. LAB4 tuloksia ei otettu analyysiin mukaan sen huonon tilastollisen edustavuuden takia. Menetelmävariaatioiden sekä tiiveysasteiden vaihteluiden takia tuloksista ei voida vetää selkeitä johtopäätöksiä. Kuitenkin osa tuloksista osoittaa, että vedenläpäisevyydet pienenevät hienoainesmäärän kasvaessa (JF, LAB1, LAB2). LAB3-tulosten trendi on lähes vaakasuora, mikä tarkoittaa, että tässä laboratoriossa tehtyjen tutkimusten mukaan hienoainespitoisuudella ei ole ollut suurta vaikutusta vedenläpäisevyyden tuloksiin. LAB2-tuloksia lukuun ottamatta, tuloksissa nähdään hyvin paljon vaihtelevuutta hienoainespitoisuuden määrästä riippumatta.



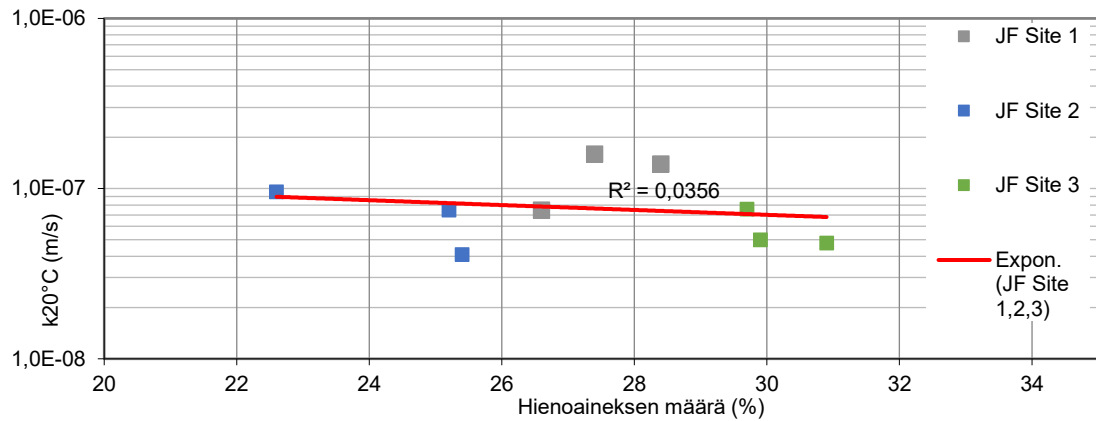
Kuva 42. Moreenin hienoaineoksen suhde vedenläpäisevyyden laboratoriotuloksiin, jossa x-akselilla hienoaineoksen määrä (%) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

Kohdassa 3.1 esitettiin MWEI BREF:in huonosti vettäläpäisevän ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s) ja hyvin huonosti vettäläpäisevän ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) arvot sekä GruvRIDAS:en arvo ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s). Taulukkoon 20 on koottu laboratoriotuloksista hienoaineksen määrä (%), jolla kyseiset arvot saavutettiin. Tulokset antavat viitteitä riittävästä hienoaineksen määrästä saavuttaa tietty vedenläpäisevyyden arvo. Tuloksia ei kuitenkaan voida käyttää suoraan johtopäätösten tekemiseen, koska osassa tuloksista hienoaineksen määrän vaihtelu on vähäistä ja tuloksiin vaikuttaa myös käytetty tutkimusmenetelmä.

Taulukko 20. Tuloksien mukainen hienoaineksen määrän (%), jolla saavutettiin MWEI BREF:in huonosti vettäläpäisevä ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s) ja hyvin huonosti vettäläpäisevä ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) arvo sekä GruvRIDAS:en arvo ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s).

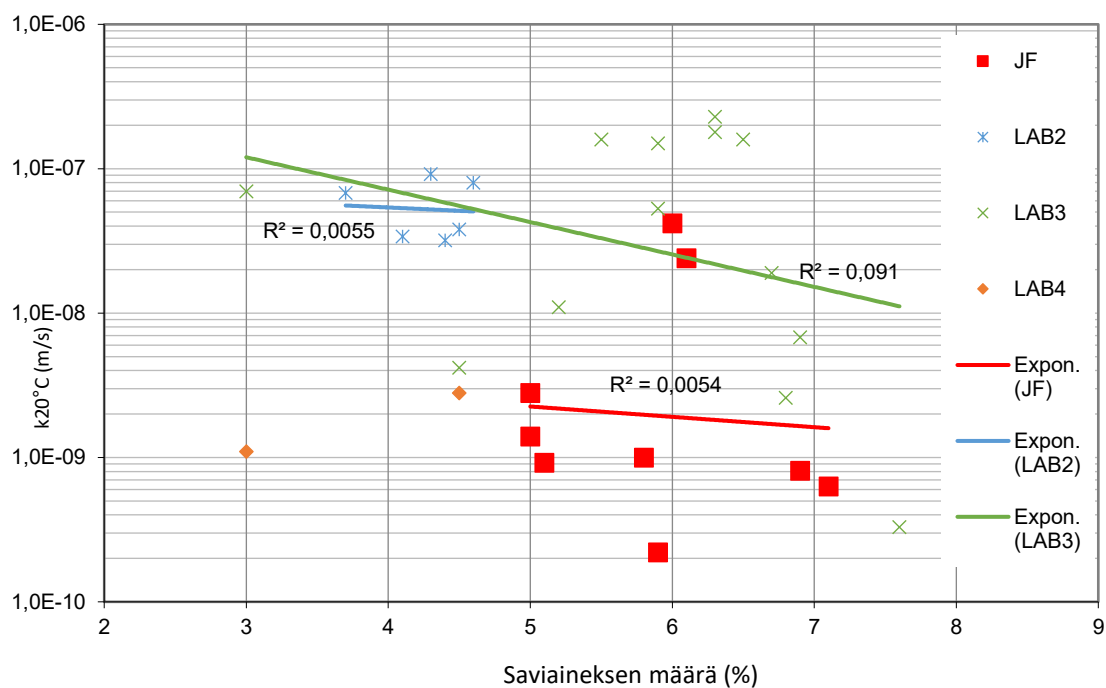
<i>Vedenläpäisevyyden laboratoriotulokset</i>	<i>Hienoaineksen määrä (%) MWEI BREF:in huonosti vettäläpäisevälle arvolle ($1 \cdot 10^{-9}$–$1 \cdot 10^{-6}$ m/s)</i>	<i>Hienoaineksen määrä (%) MWEI BREF:in hyvin huonosti vettäläpäisevälle arvolle ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s)</i>	<i>Hienoaineksen määrä (%) GruvRIDAS:en arvolle ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s)</i>
<i>JF</i>	22,6	22,6	22,6
<i>LAB1</i>	16,5	20,0	16,5
<i>LAB2</i>	24,5	-	24,5
<i>LAB3</i>	22,4	27,0	22,6

In situ -tutkimukset tukivat laboratoriotuloksista tehtyjä havaintoja, sillä Guelph-permeametrin tuloksissa on nähtävissä hieman hienoainespitoisuuden kasvun pienentävän mitattua moreenin vedenläpäisevyyttä (Kuva 43). Hienoainespitoisuuden lisäksi tiiveysaste voi vaikuttaa mitattuihin vedenläpäisyarvoihin, joten se tuo oman muuttujan in situ -mittaukseen.

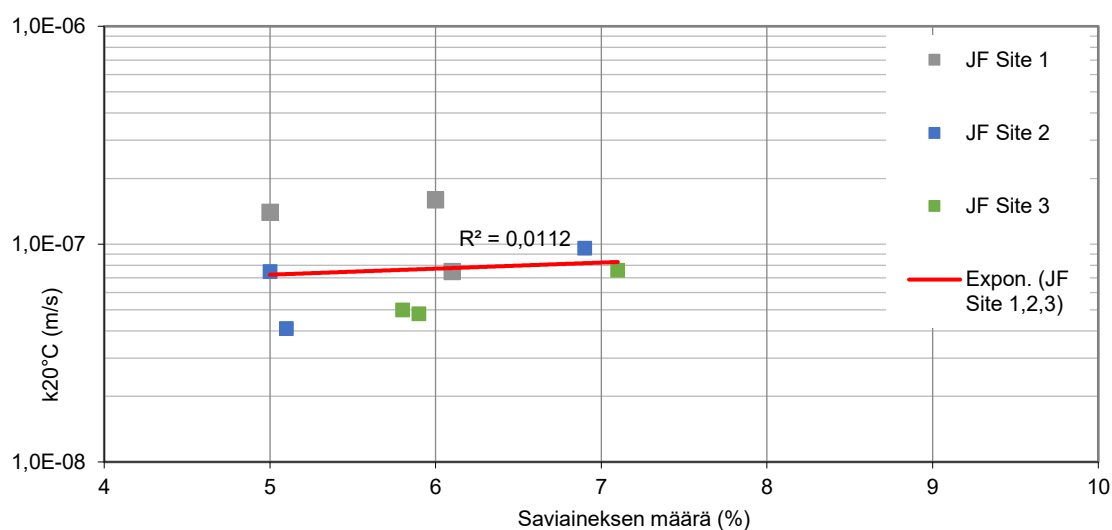


Kuva 43. Moreenin hienoaineksen suhde vedenläpäisevyyden laboratoriotuloksiin, jossa x-akselilla hienoaineksen määrä (%) ja y-akselilla in situ -mittauksen vedenläpäisevyys (m/s).

Jos hienoainespitoisuudesta otetaan kaikkein hienoin savinen osuus tarkastelun, nähdään että kaikissa näytteissä savipitoisuus oli huomattava noin 3,0–7,6 %, joten voidaan olettaa, että savella on merkitystä moreenin vedenläpäisevyyden kannalta. Saviaineksen analyysissä ovat mukana vedenläpäisevyydestulokset JF-näytteistä, joita ei ole ilmakeivattu sekä LAB2-tulokset ja LAB3-tulokset. Analyysin perusteella JF-, LAB2- ja LAB3-näytteiden osalta saviaineksen määrän kasvu vaikuttaa hieman vedenläpäisevyyttä pienentävä tekijänä laboratoriotutkimuksiin verrattessa (Kuva 44). Verrattessa saviaineksen osuutta Gueph-permeametrin tuloksiin (Kuva 45), nähdään että vastaavaa korrelaatiota ei ole havaittavissa. Tämä todennäköisesti johtuu aiemmin kerrotusta tiiveyden vaikutuksesta mitattuihin vedenläpäisyarvoihin.



Kuva 44. Moreenin saviaineksen suhde vedenläpäisevyyden laboratoriotuloksiin, jossa x-akselilla saviaineksen määrä (%) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

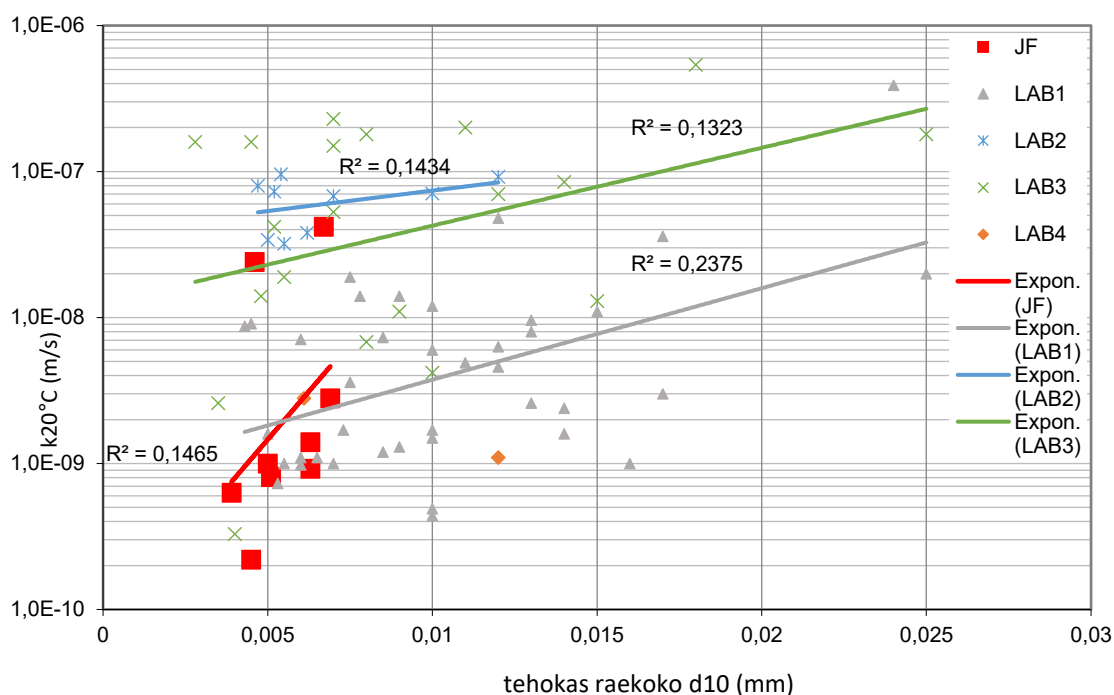


Kuva 45. Moreenin saviaineksen suhde vedenläpäisevyyden laboratoriotuloksiin, jossa x-akselilla saviaineksen määrä (%) ja y-akselilla in situ -mittauksen vedenläpäisevyys (m/s).

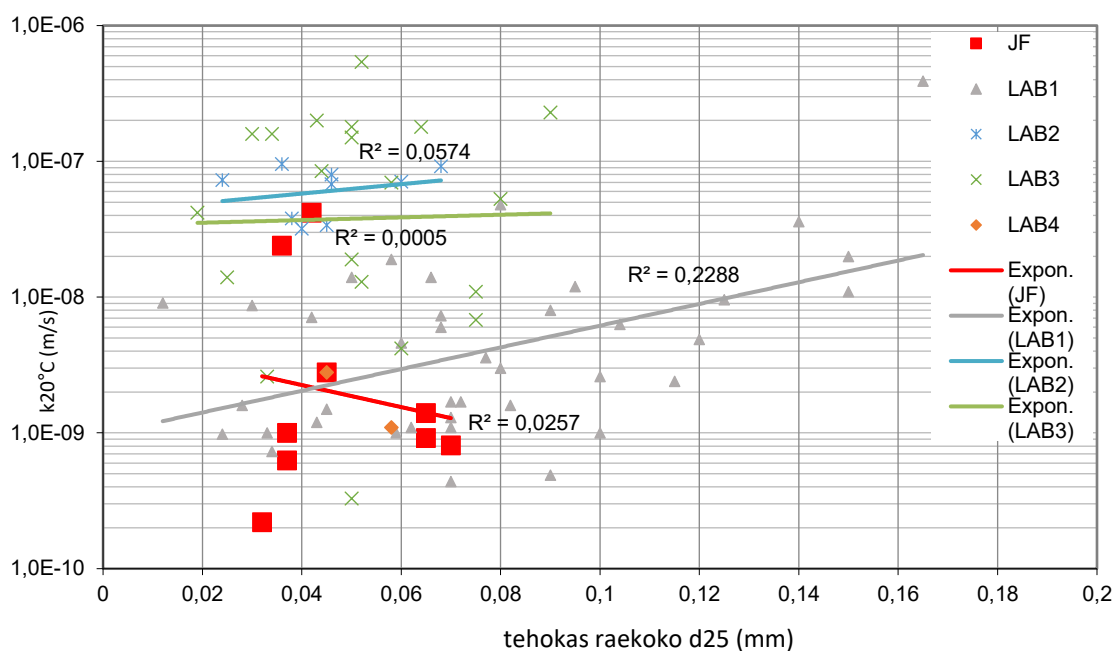
Vedenläpäisevyyden lisäksi suuremmalla savipitoisuudella vaikuttaisi olevan yhteys moreeninäytteiden optimivesipitoisuuden kasvuun (Kohta 5.2 ja taulukot 14 ja 16), mikä johtuu saviaineksen kyvystä sitoa vettä muita raekokoja enemmän. Tutkimuksessa havaittiin, että hienoainesosuudella ja varsinkin sen hienoimmalla saviosuudella on taipumusta eroosiolle niiden altistuessa kuivumiselle. Tämä havaittiin esimerkiksi S2P2-näytteessä, jossa ilmakeivatuksen jälkeen vedenläpäisevyyskokeessa tapahtui hienoaineksen kulkeutumista (Kohdan 4.3 kuva 33) ja vedenläpäisevyysarvo oli oletettua suurempi. Näytettä kostutettiin eroosion vähentämiseksi ja vasta kolmannessa rinnakkaiskokeessa runsaan veden lisäyksen jälkeen, eroosiota ei enää havaittu. Mitattu vedenläpäisevyytulos oli tällöin vertailukelpoinen ja sen havaittiin vastaavan toisella tavalla valmistettuja näytteitä. Tällä näytteellä oli JF-näytteistä suurin optimivesipitoisuus sekä toiseksi suurin savipitoisuus, jonka perusteella näyte vaati runsaan kosteuden. Muutkin tässä tutkimuksessa suoritettut vedenläpäisykokeet ilmakeivatetuilla näytteille saivat huomattavasti suurempia vedenläpäisyarvoja kuin niiden rinnakkaiskokeena tehdyt kostutetut näytteet. Tämän perusteella moreenin kuivumisella laboratorio-olosuhteissa voidaan todeta olevan huomattava vaikutus vedenläpäisykokeen tulokseen. Lisäksi, koska kuivuneiden moreeninäytteiden kostuttaminen uudestaan pienensi huomattavasti niiden vedenläpäisevyyden tuloksia, voidaan myös todeta, että moreenilla on todennäköisesti itsekorjaantuvuusominaisuuksia. Vastaavaa ilmiötä maa-aineksen itsekorjaantuvuusominaisuuksista on havaittu aikaisemmassa tutkimuksessa (Rayhani et al. 2007).

Saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa, että hienoaineksella ja erityisesti saviaineksella on yhteyttä moreenin vedenläpäisevyyteen, mutta niiden vaikutus voi olla riippuvainen toimintatavoista, jotka tavalla tai toisella vaikuttavat moreenin kosteuteen. Toimintatavat korostuvat erityisesti laboratorio-olosuhteissa, koska kaikella mitä laboratoriossa tehdään, on todennäköisesti moninkertainen vaikutus kenttäolosuhteisiin nähden, kuten esimerkiksi ilmakeivatuksella. Laboratorio-olosuhteiden lisäksi muilla työskentelytavoilla ja ympäristöolosuhteilla voi olla merkitystä. Näitä ovat esimerkiksi sää ja vuodenaika näytteenottohetkellä, näytteenotto syvyys, näytteen kuljetus ja käsittely. Väärin käsiteltyinä moreenin hienoaines ja erityisesti saviaines voivat olla alttiita eroosiolle, minkä seurauksena mitattu vedenläpäisevyys ei enää edusta moreenisen rakenteen todellista vedenläpäisevyyttä. Myös pelkästään rakenteen kuivuneesta pintakerroksesta kerätty näyte ei edusta moreenin kokonaistoimintaa rakenteessa.

Tehokkaat raekoot d10 ja d25 kertovat hienoaineksen kokonaismäärästä moreenissa. Tulokset (Kuva 46 ja 47) ovat samankaltaisia edellä esitettyjen hienoainespitoisuusanalyysien kanssa. Ainoa poikkeus on LAB4-tulokset, mutta niiden tilastollinen edustavuus on todettu huonoksi. LAB1-3-tuloksissa nähdään, että trendiviivojen mukaan molemmissa raekoissa ovat vasemmalle laskevia tarkoittaen, että mitä pienempi läpäisyprosenttia vastaava tehokas raekoko on, sitä pienempi on vedenläpäisevyys. JF-tuloksien tehokkaan raekoon d25 osalta selittää osin vedenläpäisevyyskokeissa vaihdelleet tiiveysasteet. Tutkimuksessa tehtiin lisäksi tarkasteluja tehokkaille raekoille d50 ja d60, joissa tulokset olivat hyvin samankaltaisia pienempien raekokojen kanssa LAB1 ja LAB2 osalta. JF-tuloksien trendi kääntyi näissä vahvasti vasemmalle päin laskevaksi ($R^2_{d50} = 0,36$ ja $R^2_{d60} = 0,76$), kun taas LAB3 trendi kääntyi oikealle päin laskevaksi ($R^2_{d50} = 0,07$ ja $R^2_{d60} = 0,11$).



Kuva 46. Tehokkaan raekoon d10 suhde vedenläpäisevyyden tuloksiin, jossa x-akselilla d10 raekoko (mm) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).



Kuva 47. Tehokkaan raekoon d25 suhde vedenläpäisevyyden tuloksiin, jossa x-akselilla d10 raekoko (mm) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

Kuten aiemmin tehokkailla raekoilla saavutettuja vedenläpäisevyyksiä voidaan verrata MWEI BREF:in ja GruvRIDAKS:en vedenläpäisevyyden raja-arvoihin. Taulukkoon 21 ja 22 on koottu laboriotuloksista tehokkaiden raekokojen d10 ja d25 arvot (mm), jolla kyseiset vedenläpäisevyydet saavutettiin. Tulokset antavat viitteitä riittävästä tehokkaasta raekoosta saavuttaa tietty vedenläpäisevyyden arvo. Tuloksia ei kuitenkaan voida käyttää suoraan johtopäätösten tekemiseen, koska osassa tuloksista otanta on pientä ja tuloksiin vaikuttaa myös käytetty tutkimusmenetelmä.

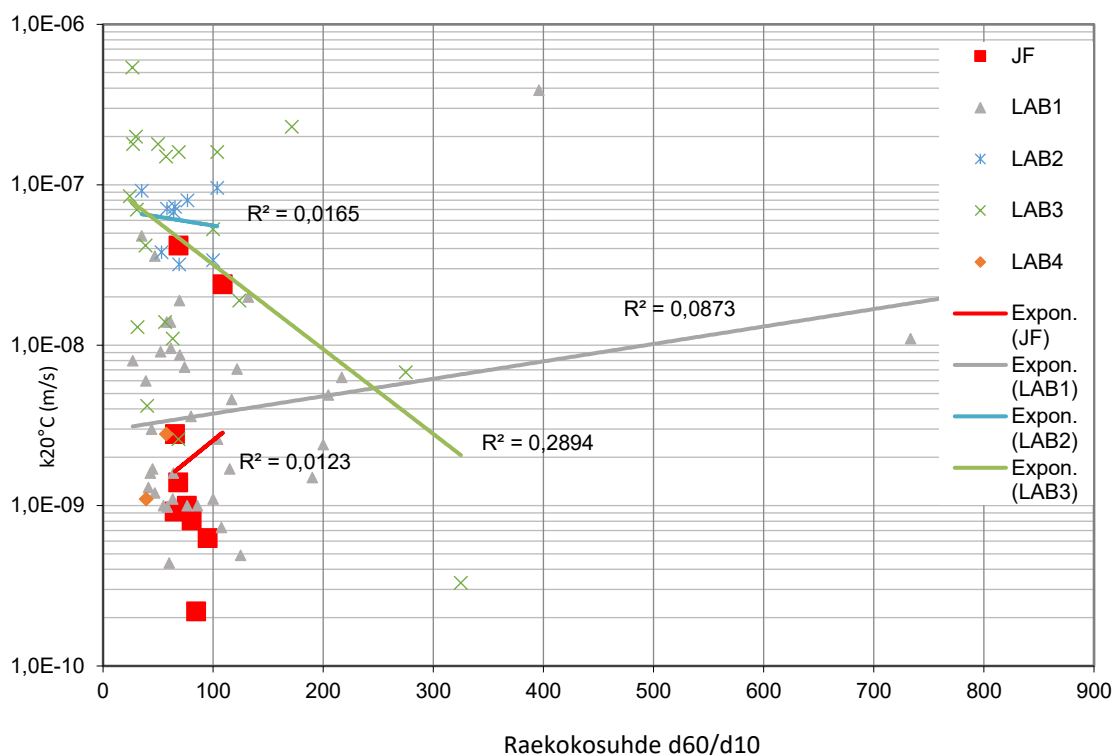
Taulukko 21. Tuloksien mukainen tehokas raekoko d10 (mm), jolla saavutettiin MWEI BREF:in huonosti vettä läpäisevä ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s) ja hyvin huonosti vettä läpäisevä ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) arvo sekä GruvRIDAKS:en arvo ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Vedenläpäisevyyden laboriotulokset	Tehokas raekoko d10 (mm) MWEI BREF:in huonosti vettä läpäisevälle arvolle ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s)	Tehokas raekoko d10 (mm) MWEI BREF:in hyvin huonosti vettä läpäisevälle arvolle ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s)	Tehokas raekoko d10 (mm) GruvRIDAKS:en arvolle ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s)
JF	0,0069	0,0069	0,0069
LAB1	0,025	0,016	0,025
LAB2	0,012	-	0,012
LAB3	0,025	0,004	0,025

Taulukko 22. Tuloksien mukainen tehokas raekoko d25 (mm), jolla saavutettiin MWEI BREF:in huonosti vettäläpäisevä ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ m/s) ja hyvin huonosti vettäläpäisevä ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) arvo sekä GruvRIDAS:en arvo ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s).

<i>Vedenläpäisevyyden laboratoriotulokset</i>	<i>Tehokas raekoko d25 (mm) MWEI BREF:in huonosti vettäläpäisevälle arvolle ($1 \cdot 10^{-9}$–$1 \cdot 10^{-6}$ m/s)</i>	<i>Tehokas raekoko d25 (mm) MWEI BREF:in hyvin huonosti vettäläpäisevälle arvolle ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s)</i>	<i>Tehokas raekoko d25 (mm) GruvRIDAS:en arvolle ($k \leq 3 \cdot 10^{-7}$ m/s)</i>
<i>JF</i>	0,07	0,07	0,07
<i>LAB1</i>	0,165	0,1	0,15
<i>LAB2</i>	0,068	-	0,068
<i>LAB3</i>	0,09	0,05	0,09

Geoteknisen maajiluokituksen mukaista raekokosuhdetta (d_{60}/d_{10}) vastaavat vedenläpäisevyydet ovat esitetty kuvassa 48. Raekokosuhteissa eri laboratorioissa tehtyjen tulosten välillä ei ole havaittavissa selvää yhtäläisyyttä moreenin vedenläpäisevyyteen. Tämä kertoo siitä, että moreeni voi olla suhteistunutta hyvin laajalla skaalalla, eikä se vaikuta merkittävästi moreenin vedenläpäisevyyteen. Raekokosuhdetta merkittävämpi tekijänä moreenissa on todennäköisesti raekäyrän muoto kokonaisuudessaan. Mikäli raekokojakaumassa on selkeästi puutteita tietyissä raekoissa voi se vaikuttaa negatiivisesti vedenläpäisevyyteen, koska rakeiden limittyessä keskenään voi niiden väliin jäädä enemmän huokostilaa.

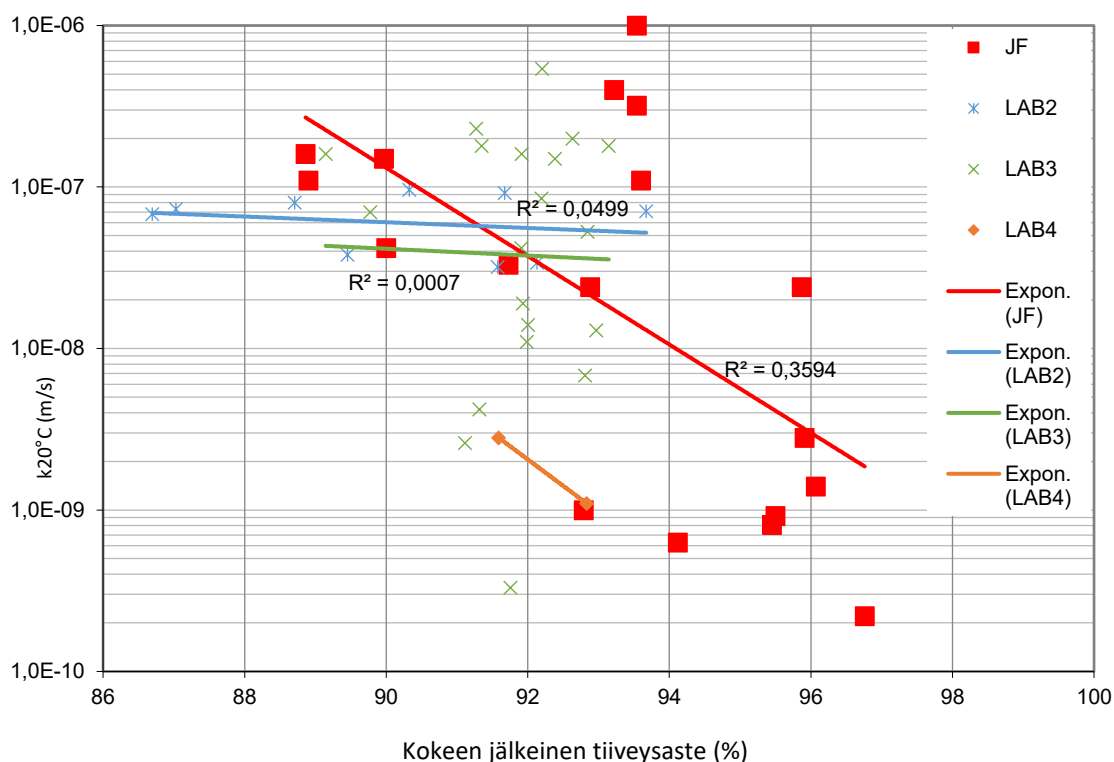


Kuva 48. Raekokosuhteen (d_{60}/d_{10}) suhde vedenläpäisevyyden laboratoriotuloksiin, jossa x-akselilla raekokosuhde ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

6.4 Tiiveyden ja tiivistystyön vaikutus vedenläpäisevyyteen

Tiiveysasteen tiedetään yleensä pienentävän materiaalin vedenläpäisevyyttä. Tiiveyden analyysissä ovat mukana kaikki JF-tulokset sekä LAB2-4-tulokset. Kuvassa 49 on esitettyä moreenin vedenläpäisykokeen jälkeiset tiiveysasteen tulokset suhteessa laboratorioissa määritettyihin vedenläpäisevyyden tuloksiin. JF-tulosten osalta tavoiteltu tiiveysaste vaihteli tarkoituksella ja LAB2-4 osalta tavoiteltu tiiveysaste oli 92 %. Koska näytteillä huomattiin olevan hieman taipumusta tiivistyä tai löyhtyä kokeen aikana, analyysissä päädyttiin käyttämään vedenläpäisykokeen jälkeen laskettua todellista tiiveysastetta. Kuvasta 49 huomataan, että LAB2, LAB3, LAB4 ja varsinkin JF-tulosten osalta tiiveysasteen kasvulla näyttää olevan vaikutusta vedenläpäisevyyttä pienentävä tekijänä. Tuloksista huomataan, että osa LAB3-näytteistä ja varsinkin LAB2-näytteet löyhtyivät vedenläpäisevyys kokeen aikana. In situ -tutkimuksissa havaittiin tiiveyden mittaamisessa Troxler-laitteella olevan maaperän tasaisuudella merkitystä

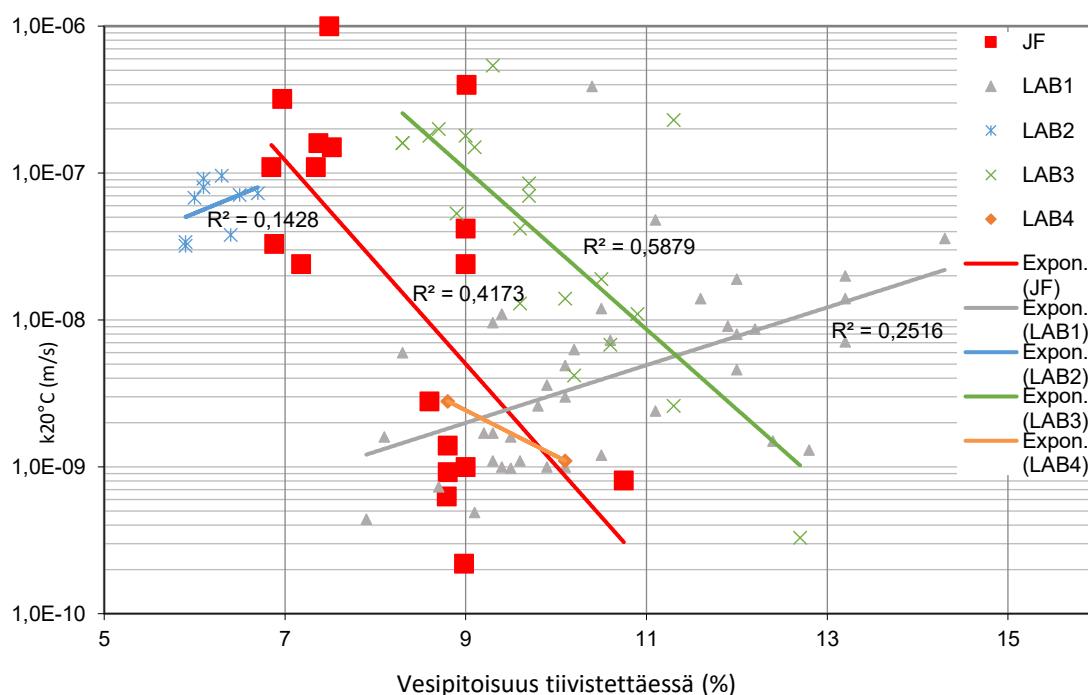
mittaustulokseen. Sen vuoksi kyseiset tulokset eivät ole kovin luotettavia, lukuun ottamatta site 1 -tuloksia. Site 2 ja site 3 -tutkimusalueilla maan jäätymisellä tutkimusajankohtana on voinut olla vaikutusta tuloksiin. Kentällä tehtyjen volymetrikokeiden tuloksia tarkastelemalla (Kohdan 5.1 taulukko 13), huomataan niiden korreloivan laboratoriotutkimusten ja in situ vedenläpäisytulosten kanssa. Muualla tehdyt tutkimustulokset (Kohdan 5.3 liite 6) tukivat havaintoa, että Troxler-laitteella mitatuilla tiiviimmillä alueilla, Guelph-permeametrin ja double ring -infiltrimetrin vedenläpäisevyyden tulokset olivat pienempiä.



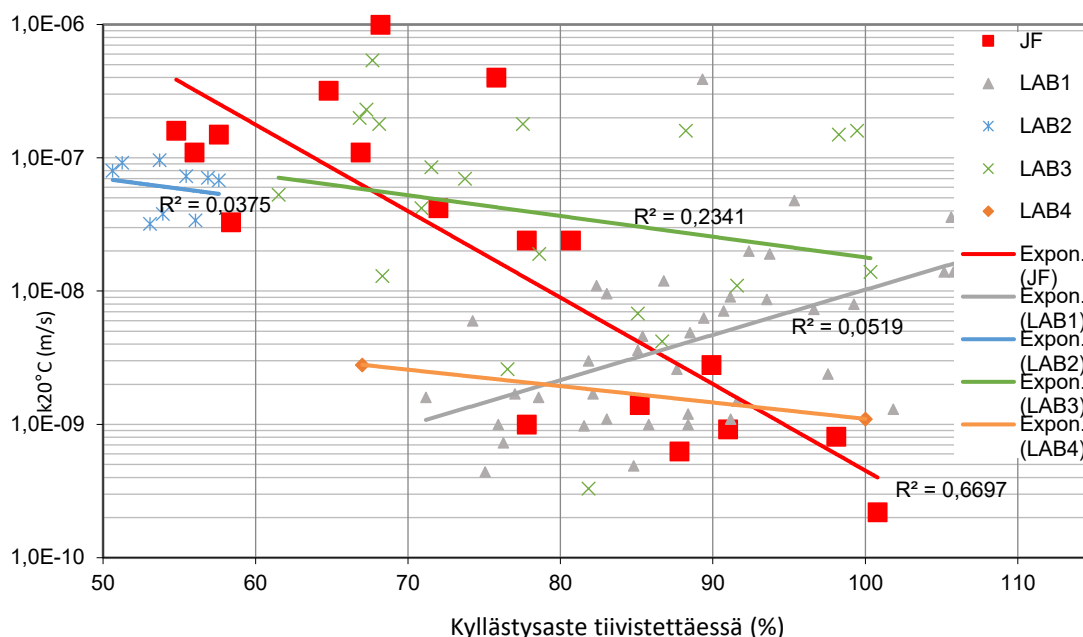
Kuva 49. Kokeen jälkeisen tiiveysasteen suhde vedenläpäisevyyden tuloksiin, jossa x-akselilla tiiveysaste (%) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

Osana tiiveysastetta, tarkasteltiin myös näytteen vesipitoisuutta ja kyllästysastetta näytteen tiivistyshetkellä (Kuva 50 ja 51). Tässä analyysissä olivat mukana kaikki laboratoriotutkimukset. LAB1-tulosten trendi sekä vesipitoisuuden että kyllästysasteen mukaan on se, että molempien muuttujien kasvu suurentaa vedenläpäisevyyttä. Teoriassa asian pitäisikin olla niin, että mitä saturoituneempaa maa on, sitä suurempi vedenläpäisevyys sillä on. JF- ja LAB3- tulosten osalta trendi on hyvin vahvasti

päinvastainen kuin LAB1-tuloksissa. Näiden tulosten mukaan vesipitoisuuden ja kyllästysasteen kasvattaminen tiivistettäessä laskee lopullista mitattua vedenläpäisevyyttä. LAB2-tulosten osalta näytteiden kyllästysasteet ja vesipitoisuudet olivat hyvin samankaltaisia kaikilla näytteiden, jonka takia selvää trendin muodostumista ei nähdä. Lisäksi tiivistämisessä käytetyn alemman kosteuden takia LAB2-tuloksissa ei todennäköisesti päästy yhtä pieniin tuloksiin kuin JF- ja LAB3-tuloksissa. LAB4-tulosten osalta trendi on samankaltainen kuin JF-tuloksilla ja LAB3-tuloksilla, mutta kuten aiemmin kerrottiin, LAB4 tulosten tilastollinen edustavuus on huono.



Kuva 50. Tiivistämisessä käytetyn vesipitoisuuden suhde vedenläpäisevyyden tuloksiin, jossa x-akselilla vesipitoisuus (%) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).



Kuva 51. Tiivistämisessä käytetyn kyllästysasteen suhde vedenläpäisevyyden tuloksiin, jossa x-akselilla kyllästysaste (%) ja y-akselilla laboratorioissa mitattu vedenläpäisevyys (m/s).

Tiivistämisessä käytettävä vesipitoisuuden ja kyllästysasteen vaikutus huomattiin selkeästi tässä tutkimuksessa tehtyjen ilmakeivattujen ja kostutettujen näytteiden osalta. Yhteyden kosteassa tiivistettyjen näytteiden ja pienemmän vedenläpäisevyyden välille muodostaa se, miten vesipitoisuuden muuttuminen voi vaikuttaa moreenin kokoonpuristuvuuteen ja näin vedenläpäisevyysominaisuuksiin. Ilmiö korostuu erityisesti moreenin saviosuudella, kuten kohdan 2.3 kuvassa 3 on esitetty. Optimivesipitoisuudesta poikkeava tiivistystyö voi olla oleellista tilanteissa missä maksimikuivatilavuuspaino ei ole rakenteelta vaadittu tärkein ominaisuus.

Käytännössä kosteammassa tiivistetystä näytteestä muodostuu plastisempi ja näyte toimii paremmin kokonaisuutena, kun sen sisältämät paakut hajoavat ja huokostilaan ei jää virtauskanavia. Kyseistä ilmiötä on havaittu muissa aikaisemmissa tutkimuksissa (Hong 2008; Saadel & Froc 2016). Tämän lisäksi optimivesipitoisuudesta poikkeavassa vesipitoisuudessa tiivistäminen vaatii teoreettisesti enemmän työtä saavuttaakseen sama tiiveysaste (esimerkiksi 92 %) kuin optimivesipitoisuudessa tiivistettäessä. Tämä johtuu siitä, että 100 % teoreettinen tiiveysaste on saavutettavissa vain optimivesipitoisuudessa ja siitä poikkeavassa vesipitoisuudessa teoreettinen tiiveyden maksimi laskee, mutta

tavoiteltava tiiveysaste ei. Tiivistämistyöhön käytetyllä energian kasvulla voi tällöin olla ratkaiseva merkitys moreeninäytteen muodostumisen ja kokonaistoiminnan kannalta. Käytännössä kosteampi näyte tuntui tiivistäessä tiivistyvän paremmin kuin kuivempi näyte. Laboratoriotuloksissa pienempiä vedenläpäisevyyksiä saavutettiin optimivesipitoisuuden märemmällä puolella. Tutkimuksessa ei kuitenkaan perehdytty, onko moreenisen tiivisrakenteen rankentaminen tällöin enää mahdollista. Kirjallisuuden mukaan jo 2 % optimivesipitoisuuden ylitys voi tehdä moreenista jo juoksevaa, minkä takia optimivesipitoisuudesta poikkeavaa tiivistystyötä ei suositella rakentamiseen tämän tutkimuksen perusteella (Tielaitos 1993). Huomioitavaa on, että tutkimuksissa tehty rakeisuuden katkaisu kasvattaa suhteellista kosteutta, minkä takia tilanne ei ole täysin sama kenttäolosuhteissa.

Tutkimuksessa huomattiin, että moreeninäytteet paakkuuntuivat kuivuessa ja ilmakeivatuista moreeneista valmistetut näytteet vaikuttivat hauraammilta. Kuivempia näytteitä tiivistäessä todennäköisesti kävi niin, että moreenin sisältämät paakut eivät hajonneet vaan ne vain tiivistyivät toisiaan vasten. Tällöin veden virtauskanavat muodostuivat paakkuja myötäillen niiden välejä pitkin, jonka seurauksena ilmakeivattujen näytteiden osalta mitattiin suurempia vedenläpäisevyyksiä. Koska vesipitoisuudella ja kuivumisella on vaikutusta laboratorion vedenläpäisevyysskokeessa käytettävään näytteen laatuun ja tulokseen, tarkoittaa se sitä, että työskentelytavoissa ja ympäristöolosuhteissa pitää kiinnittää samoihin asioihin huomiota kuin aikaisemmin kerrotussa hienoaineksen vaikutukset kohdassa. Maastotutkimuksien yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella moreenin paakkuuntumista ei ollut huomioitavissa kenttäolosuhteissa.

6.5 Vedenpidätyskyvyn korrelaatio vedenläpäisevyyteen

Kohdan 5.2 kuvassa 40, esiteltiin kaikkien moreenien vedenpidätyskyvyn tulokset yhdessä. Tulosten perusteella tulkitulla moreenilla ei ole selvää pistettä, jossa näytteet luovuttaisivat vettä, kuten perinteisellä hiekalla havaitaan. Pieni muutos voidaan havaita noin pF-luvun 1,65 kohdalla, joka vastaa noin 45 cm vesipatsaan aiheuttamaa alipainetta. Tästä eteenpäin moreenit luovuttivat vettä hyvin maltillisesti ja tasaisesti pF-luvun kasvaessa, eikä eroja enää havaittu kokeen lopussa. Kokeen kyllästysvaiheessa havaittiin, että site 1 moreeninäytteet kyllästyivät hitaimmin ja imivät enemmän vettä kuin moreenit site 2:lta ja site 3:lta, joka on nähtävissä tuloksissa.

Moreenien tilavuusvesipitoisuuksien arvoja kokeen alussa ja lopussa vertaamalla kostutettujen moreeninäytteiden vedenläpäisevyyksiin sekä in situ -tuloksiin, huomataan selvä korrelaatio tuloksien välillä tutkimusalueittain (Taulukko 17). Eli site 3 moreenin alun tilavuusvesipitoisuudet sekä tilavuusvesipitoisuuden muutokset kokeen aikana olivat pienimpiä, niin kuin site 3 moreenin vedenläpäisevyydet. Vastaavasti nämä arvot site 1 alueella olivat suurimmat, niin kuin myös alueen moreenin vedenläpäisevyys. Site 2 alueen moreeni asettui sekä tilavuusvesipitoisuuksien tulosten, että vedenläpäisevyyden osalta muiden site alueiden välille. Moreenin vedenläpäisevyyden tuloksiin verrattaessa, kostutettujen näytteiden vedenläpäisevyydet vastasivat tyypillisten siltin tai saven vedenläpäisevyyksiä (Airaksinen 1978). Myös vedenpidätyskykykokeen tulosten perusteella moreenien pF-käyrän käyttäytyminen vastasi eniten tyypillisen saven tai siltin käyttäytymistä, mikä tukee moreenille mittauksissa saatuja pieniä vedenläpäisevyyden arvoja. Otantana yhdeksän näytteen testitulokset on pieni, joten varmoja johtopäätöksiä ei voida tehdä.

6.6 Tutkimusmenetelmien vaikutus ja vedenläpäisevyyden arviointi

Vedenläpäisevyyden in situ -tutkimukset ovat esitelty kohdassa 5.1 taulukko 13 sekä kohdassa 5.3 liite 6. In situ -tutkimusmenetelmien havaittiin tutkimuksessa antavan keskimäärin isompia vedenläpäisevyyden tuloksia kuin laboratoriomenetelmien. Tuloksista double ring -infiltrometri antoi keskimäärin tasaisempia ja suurempia vedenläpäisevyyksiä kuin Guelph-permeametri. Epävarmuustekijöitä Guelph-permeametrin osalta huomattiin kairareian seinien valuminen, mahdolliset ilmalukot ja laitteelle määritetyt rajaehdot ($1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ m/s) (Soilmoisture 2012). Molempien menetelmien osalta epävarmuustekijöitä mittauksissa oli maaperän kerroksellisuus (epähomogeenisuus), mittaustulosten vaikealukuisuus ja maaperän kyllästyneisyys mittaushetkellä. Samankaltaisia huomioita tehtiin osittain alueelle aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa (AFRY Finland Oy 2021b). Tieto maaperän kyllästyneisyydestä mittaushetkellä on oleellinen tieto, koska kaavat olettavat maaperän olevan kyllästynyttä. Lisäksi veden imeytyessä maahan hyvin hitaasti, epävarmuudeksi nousee imeytymisen seuraaminen mitta-asteikolta. Tällöin mittausten tekijä voi olettaa, että laitteessa on joku vika, jonka seurauksena vettä ei imeydy maahan, vaikka todellisuudessa maan vedenläpäisevyys on todella pieni. Ongelma voi olla myös päin vastainen. Double ring -infiltrimetrin osalta pienimpiä vedenläpäisevyyksiä saatiin tutkimuspisteillä, missä maan

kunnollinen saturoituvuus oli silminnähävissä. Guelph-permeametrin osalta maan kyllästyneisyyden havainnointi on vielä vaikeampaa, koska mittaus toteutetaan kairareissä. Guelph-permeametrin tulokset eivät olleet lupaavia niiden vaihtelevuuden ja mittauss ongelmien takia, mutta eräässä toisessa aiemmassa tutkimuksessa toistettavia arvoja oli saatu moreeneille lähes $1 \cdot 10^{-8}$ m/s asti, joten menetelmän soveltuvuutta ei voida täysin poissulkea (Macdonald et al. 2012). Myös mittauksen tekijän taidot nousevat esille lopullisessa vedenläpäisevyyden tuloksen muodostumisessa. Kokenut mittaaja osaa paremmin huomioida mahdolliset mittauksiin liittyvät ongelmat. Lisäksi vuodenajalla ja keliolosuhteilla on todennäköisesti vaikutusta vedenläpäisevyyden mittaamiseen. Näitä ovat esimerkiksi sade, joka vaikuttaa maan kyllästymiseen ja lämpötila, joka vaikuttaa veden viskositeettiin. Työssä havaittujen ongelmien perusteella, in situ -mittauksia ei suositella tekemään talviaikaan, kuten tässä työssä tehtiin. Lumi ja jääkinokset voivat talvikauden aikaan tiivistää maata luonnollisesti, jolloin samalta alueelta voidaan talven jälkeen saada pienempiä vedenläpäisevyyden tuloksia.

Vedenläpäisevyyden laboratoriotutkimukset ovat esitelty kohdassa 5.2 taulukko 18 sekä kohdassa 5.3 liitteessä 6. Kirjallisuuden mukaan vedenläpäisevyyden määrittäminen muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä olisi paras käytettävä menetelmä (Suomen ympäristökeskus 1995). Menetelmän tulokset vaihtelivat suuresti varsinkin LAB3 osalta ja JF ilmakeivattujen ja kostutettujen näytteiden osalta. Menetelmään tuntuu vaikuttavan merkittävästi työskentelytavat, kuten vesipitoisuus ja kyllästysaste tiivistäessä. Tämä on selkeästi huomattavissa JF- ja LAB3-tulosten osalta kohdan 6.4 kuvissa 50 ja 51, missä vedenläpäisevyyden tulos on ollut pienempi mitä kosteampi näyte on tiivistettäessä ollut. LAB2 osalta vesipitoisuudet ja kyllästysasteet kokeen alussa olivat niin samankaltaisia, ettei selkeää trendiä muodostunut. LAB2 vedenläpäisevyyden tuloksista kuitenkin huomataan, että ne kasautuvat kuvissa lähelle JF ilmakeivattujen näytteiden tuloksia, joiden vesipitoisuus ja kyllästysaste olivat lähellä LAB2-näytteitä. kohdassa 2.3 kerrottiin moreenin eroosioherkkyydestä laboratorio-olosuhteissa sekä itsekorjaantuvuusominaisuuksista, minkä perusteella menetelmässä korostuu käytetty kyllästystapa (painetasojen nosto) ja kyllästysaika. Kuivumisen aiheuttamasta eroosiosta kärsinyt näyte ei anna enää todellista kuvaa moreenin toiminnasta osana rakennetta, jolloin riittävä kyllästysaika ja rauhallinen painetasojen nosto voi auttaa palauttamaan näytteen käyttäytymisen enemmän todellisuutta vastaavaksi. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että kevyemmän sullontakalustus vaihtaminen proctor-vasaraan pienensi vedenläpäisevyyden tuloksia. Tämän perusteella näytteen tiivistämiseen käytetyllä

menetelmällä on vaikutusta tulokseen, kuten onko tiivistäminen tehty proctor-vasaralla tai IC-testerillä.

Kirjallisuuden perusteella LAB4-tuloksissa käytetty vakioapaineen soveltuvuus on kyseenalainen, koska tulokset saattavat olla liian pieniä todellisuuteen verrattuna (Suomen ympäristökeskus 1995). Vastaavia ja pienempiäkin vedenläpäisevyyden tuloksia saavutettiin myös muilla menetelmillä. Kuten aiemmin mainittiin, kahden tutkimuksen perusteella LAB4-tulosten tilastollinen edustavuus on huono. LAB1 menetelmän (muuttuvapaineinen ja jäykkäseinäinen) tulokset olivat johdonmukaisimpia lähes kaikilla osa-alueilla miltä lähtötiedot löytyivät: läpäisyprosentit, hienoaines sekä vesipitoisuus ja kyllästysaste ennen koetta. Kyseinen menetelmä oli ainoa missä suurempi kyllästysaste ennen koetta suurensi vedenläpäisevyyttä, mikä kertoo siitä, että menetelmien valinnalla on merkitystä vedenläpäisevyyden tuloksen kannalta. Tuloksien järkevyyteen voi vaikuttaa kattava aineisto. Kirjallisuuden mukaan LAB1 (muuttuvapaineinen ja jäykkäseinäinen) menetelmän soveltuvuus on kyseenalainen näin heikosti vettä johtavalle maalajille (Suomen ympäristökeskus 1995).

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttaa epäsuorasti tutkimus- ja työskentelymenetelmien valinta. Saman moreeninäytteen (S2P2) vedenläpäisevyyttä saatiin pelkästään työskentelymenetelmiä muuttamalla pienennettyä yli 1000-kertaisesti laboratorio-olosuhteissa. Lisäksi kuten aiemmin mainittiin, in situ -tulokset olivat keskimäärin suurempia kuin laboratoriossa mitatut vedenläpäisevyyden arvot. Tämä kertoo siitä, että moreenin vedenläpäisevyyttä arvioidessa vaatimusten tulisi olla sidonnaisia käytettyyn menetelmään, koska tutkimusmenetelmien tulokset eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Vedenläpäisevyyden arvioinnissa tulisi kiinnittää erityistä huomiota yhteisiin ohjeisiin, jota noudatetaan kussakin tutkimusmenetelmässä. Standardeista löytyy ohjeita esimerkiksi näytteen ja kokeen laatuluokkiin, jotka pitäisivät olla yhtenäisiä (Liikenneviraston ohjeita 2015; SFS-EN ISO 17892-11:2019). Standardien ASTM D 5084-90 ja SFS-EN ISO 17892-11:2019 mukaan kokeen jälkeisen kyllästysasteen tulisi olla vähintään 95 %, jonka suurin osa laboratoriotuloksista saavutti, mutta esimerkiksi yksikään LAB2-tulos ei saavuttanut (ASTM D 5084-90; SFS-EN ISO 17892-11:2019). Myös kuten aiemmin mainittiin, in situ -tuloksissa oli epävarmuutta maan saturoitumisen kannalta. Lisäksi kahdessa LAB2-tulosten näytteissä, tiiveysaste löytyi kokeen aikana tavoitellusta 92 % tiiveysasteesta kokeen jälkeiseen tiiveysasteeseen noin 87 %. Työssä ei tutkittu voiko rakennettu moreeni löytyä

kenttäolosuhteissa näin paljoa, joten tutkittavaksi ja päätettäväksi jääkin ovatko tällaiset tulokset enää hyväksyttäviä moreenin vedenläpäisevyyden arvioinnin kannalta tai vastaatko ne todellisia kenttäolosuhteita.

Kuten tuloksista huomataan, yksittäisiä poikkeamia tulee todennäköisesti aina olemaan sekä in situ-, että laboratorio-olosuhteissa. Yhteisillä pelisäännöillä näiden poikkeamien määrää voidaan pienentää. Koska yksi suurempi arvo voi nostaa mitattujen tulosten vedenläpäisevyyden keskiarvoa huomattavasti, on keskimääräisen tuloksen perusteella tehtävä tarkastelu huono tapa arvioida moreenin vedenläpäisevyyttä, varsinkin jos keskimääräinen arvo koostuu eri tutkimusmenetelmillä mitatuista arvoista. Poikkeamien takia vedenläpäisevyyden arvioinnissa, vedenläpäisevyyden tulos ei välttämättä kuvaa parhaiten rakenteelta toivottua toimintaa, vaan vedenläpäisevyyden riittävyttä voidaan arvioida esimerkiksi tiiveysasteen, hienoaineksen määrän, tehokkaan raekoon d₁₀ tai niiden yhdistelmien avulla. Tärkeämpää vedenläpäisevyyden arvioinnissa olisi seurata samassa kertaluokassa tai muuten toisiaan lähellä olevia toistuvia arvoja ja jättää selkeät poikkeamat huomioimatta. Suurten arvojen lisäksi poikkeamat voivat olla myös liian pieniä arvoja, jotka voivat johtua esimerkiksi in situ -mittauksissa mainituista ongelmista tai laboratorio-olosuhteissa laitteiston tukkeutumisesta.

Tulosten perusteella vedenläpäisykokeiden jatkotutkimuksia suositellaan toteuttamaan häiriintymättömälle näytteelle sekä raekooltaan 0–32 mm näytteelle. Häiriintymättömällä näytteellä voitaisiin varmistaa, ettei laboratorio-olosuhteissa moreeninäytteeseen kohdistu mitään muutosta, kuten kuivumisen aiheuttamaa eroosiota. Häiriintymättömän näytteenoton toteutuksessa on oltava tarkkana moreenin tiiveyden takia, sillä näytteenoton hetkellä moreenissa oleva kivi voi huonossa asennossa repiä virtauskanavan, kun sitä kerätään näytteenottoastiaan. 0–32 mm näytteellä voitaisiin tutkia kivisyyden vaikutusta vedenläpäisevyyden tulokseen, sillä kaikki tutkimukset ovat nyt toteutettu raekoolla 0–16 mm. 0–32 mm näytteellä tehty vedenläpäisevyyden koe kuvaisi paremmin kenttäolosuhteita sekä antaisi viitteitä kivisyyden vaikutuksesta vedenläpäisevyyteen. In situ -tutkimuksien osalta lisätutkimukset ovat tarpeellisia. Guelph-permeametrin ja double ring -infiltrimetrin soveltuvuuden testaamista voidaan jatkaa tai kokeilla muita menetelmiä. Guelph-permeametrin osalta voitaisiin tutkia mahdollisuutta lisätä karkearakeista soraa kairareikään ehkäisemään hienoaineksen valumista kuopan pohjalle, kuten eräässä toisessa tutkimuksessa oli tehty (Macdonald et al. 2012).

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Samalle moreeninäytteelle oli mahdollista saada yli 1000-kertaisia eroja vedenläpäisevyyden mittaamisessa. Se kertoo siitä, että vedenläpäisevyys on riippuvainen useasta tekijästä eikä yksittäisen asian mittaaminen normaalisti riitä. Muuttujat voivat olla myös riippuvaisia toisistaan siten, että kun tekijä yksi muuttuu, voi tekijöiden kaksi ja kolme merkitys vedenläpäisevyyden kannalta pienentyä tai kasvaa. Näiden riippuvuussuhteiden selvittäminen on haastavaa ja vaatisi pitkäjänteistä tutkimusta.

Empiirisillä laskentayhtälöillä arvioidut vedenläpäisevyydet vaihtelivat, eikä niitä suositella käytettävän moreenisen rakenteen vedenläpäisevyyden laadunvarmistukseen. Moreenin suuri raekokosuhde ja pieni tehokasraekoko ovat tekijöitä, jotka rikkovat useimpien laskentayhtälöiden reunaehtoja. Tulosten tarkkuuden kannalta nähtiin välttämättömäksi, että laskentayhtälö huomioi huokoisuustekijän. Lähimmäksi mitattuja arvoja päästiin Kozeny-Carmanin yhtälöllä in situ -mittausten osalta, Terzaghin kaavalla kostutettujen näytteiden osalta ja Hazenin yhtälöllä ilmakeivattujen näytteiden osalta. Jatkotutkimuksissa pitäisi tarkastella myös muita laskentamenetelmiä kuten Fair ja Hatch, Alymani ja Sen, Zunker, Kruger, Chapuis sekä NACFAC.

Laserdiffraktiolla tehdyt rakeisuuden määritykset olivat samansuuntaisia seulonnan ja areometrin kanssa, mutta menetelmän havaittiin yliarvioivan hienoaineksen osuutta ja aliarvioivan saviaineksen osuutta. Tämä johtuu todennäköisesti rakeiden muodosta ja paakkuuntumisesta, mitä aikaisemmin tehdyssä tutkimuksessa on huomattu tapahtuvan (Lopez et al. 2012). Moreeniaineksen paakkuuntumista havaittiin elektromikroskooppikuvissa esikäsittelystä huolimatta. Näytteiden esikäsittelymenetelmällä on todennäköisesti vaikutusta tulokseen. Tämän tutkimuksen perusteella menetelmää ei suositella kohdealueen moreenin rakeisuuden laadunvarmistukseen.

Tutkimuksessa huomattiin, että hienoaineksen osuudella ja tehokkaalla raekoolla d₁₀ on merkittävä vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen sekä laboratorio- että in situ -olosuhteissa. Saviaineksen osuudella ja suuremmilla tehokkailla raekoilla vaikutusta vedenläpäisevyyteen oli havaittavissa, mutta niiden merkitys oli vähäisempi. Raekokosuhteella ei ollut havaittavissa selvää yhteyttä moreenin vedenläpäisevyyteen.

Moreenin hienoaines ja erityisesti saviaines ovat väärin käsiteltyinä alttiita eroosiolle laboratorio-olosuhteissa, jonka havaittiin suurentavan vedenläpäisevyyttä. Eroosiosta kärsineestä moreenista mitattu vedenläpäisevyyden tulos ei kuvasta moreenisen tiivisrakenteen toimintaa kenttäolosuhteissa. Moreenilla ja erityisesti sen saviosuudella on itsekorjaantuvuusominaisuuksia maa-aineksen kostuessa uudestaan kuivumisen jälkeen, jota on havaittu muussa aikaisemmassa tutkimuksessa (Rayhani et al. 2007). Tästä syystä mittauksissa on syytä kiinnittää huomiota riittävään kyllästysaikaan ja oikeanlaiseen kyllästystapaan. Itsekorjaantuvuusominaisuuden takia eroosiota ei todennäköisesti esiinny kenttäolosuhteissa kuin pintakerroksessa, jolla ei rakenteen toiminnan kannalta ole merkitystä. Tästä huolimatta moreenin eroosioherkkyyttä suositellaan tutkimaan kostumisen ja kuivumisen osalta sekä mahdollisesti myös jäätyvän ja sulamisen osalta, mitä tässä tutkimuksessa ei tutkittu.

Moreenin tiiveydellä havaittiin olevan selvä korrelaatio vedenläpäisevyyteen sekä laboratorio- että in situ -olosuhteissa. Tutkimuksessa huomattiin tiiveyden vaikuttavan vedenläpäisevyyteen enemmän kuin hienoaineksen määrän tai tehokkaan raekoon d₁₀. Tiivistämisessä käytetyllä vesipitoisuudella ja kyllästysasteella havaittiin olevan vaikutusta vedenläpäisevyyden tulokseen laboratorio-olosuhteissa. Useimmissa laboratoriomenetelmissä pienimpiä vedenläpäisevyyksiä saavutettiin, kun tiivistäminen tehtiin optimivesipitoisuuden märemmällä puolella. Kyseistä ilmiötä on havaittu muissa aikaisemmissa tutkimuksissa, mikä perustuu näytteen plastisemman ja tasalaatuisemman koostumuksen muodostumiseen (Hong 2008; Saadel & Froc 2016). Kuivumisen vaikutus vedenläpäisevyyteen tulisi minimoida tekemällä näytteenotto tarpeeksi syvältä. Pintakerroksesta tehty näytteenotto, ei anna oikeaa kuvaa moreenisen tiivisrakenteen toiminnasta. Moreenin juoksettavuuden takia, tiivistämistä optimivesipitoisuuden märemmällä puolella ei suositella rakentamisessa ilman lisätutkimuksia.

Vedenläpäisevyyskokeiden tutkimus- ja työskentelymenetelmillä havaittiin olevan selvää vaikutusta mitattuun moreenin vedenläpäisevyyteen sekä in situ- että laboratoriotutkimusten osalta. Erilaisilla vedenläpäisevyyden tutkimusmenetelmillä määritetyt tulokset eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Tutkimustuloksiin vaikuttavia epävarmuustekijöitä havaittiin etenkin in situ -mittauksien yhteydessä. In situ -tutkimuksien osalta suositellaan lisätutkimuksia käytössä olevien menetelmien soveltuvuuteen sekä muiden menetelmien testaamiseen. Laboratorion vedenläpäisevyyskokeissa havaittiin erityisesti työskentelytapojen vaikuttavan

vedenläpäisevyyden tulokseen. Huonoilla käytännöillä vaikutetaan vedenläpäisevyyden tulokseen siten, että tulokset eivät vastaa enää moreenisen tiivisrakenteen toimintaa kenttäolosuhteissa. Yhtenäistämällä käytäntöjä, poikkeavat vedenläpäisevyyden tulokset saadaan minimoitua ja vedenläpäisevyysarvoista vertailukelpoisempia. Moreenin vedenläpäisevyyden arviointia voi olla järkevämpää arvioida muiden tekijöiden avulla kuten tiiveysasteen, hienoaineksen määrän ja tehokkaan raekoon d_{10} kautta, kuin pelkästään vedenläpäisevyyden tuloksen. Jatkotutkimuksiksi laboratoriossa tehtävien vedenläpäisevyyden määrityksien osalta suositellaan kokeissa testattavaksi häiriintymätöntä näytettä sekä laajemman rakeisuuden omaavaa näytettä (0–32 mm).

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin läpi Agnico Eagle Finland Oy:n ympäristönsuojelurakenteissa käytettävän moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä. Maastotutkimuksiin kuului Troxler-mittalaitteen mittauksia, volymetrikokeita sekä vedenläpäisevyyden määrittämiä Guelph-permeametrilla ja double ring -infiltrometrillä. Laboratoriotutkimuksiin kuului proctor-kokeita, mikroskooppitutkimuksia, vedenpidätyskykykokeita, rakeisuuden määrittämiä seulomalla, areometrillä ja laserdiffraktiolla sekä vedenläpäisevyyden määrittämiä vakiopainekokeita joustavaseinämaisessä sellissä, muuttuvapainekokeita jäykkäseinämaisessä sellissä ja muuttuvapainekokeita joustavaseinämaisessä sellissä. Työssä myös tarkasteltiin rakeisuuteen perustuvien empiiristen laskentayhtälöiden soveltuvuutta moreenin vedenläpäisevyyden arviointiin. Käytetyt laskentayhtälöt olivat Breyer, Kozeny-Carman, Hazen, Slitcher, Terzaghi ja U.S Bureau of Reclamation (USBR).

Tulosten vertailussa havaittiin, että useimmissa tutkimusmenetelmissä moreenin vedenläpäisevyyden tuloksissa esiintyy huomattavasti vaihteluja, eivätkä eri menetelmillä mitatut k-arvot ole suoraan verrannollisia keskenään. Tutkituista muuttujista parhaiten kohdealueen moreenin vedenläpäisevyyden tuloksien kanssa korreloivat tiiveysaste, hienoaineksen määrä, tehokas raekoko d₁₀ sekä kyllästysaste ja vesipitoisuus tiivistettäessä. Raekokosuhdetta merkittävämpi tekijänä moreenissa on raekäyrän muoto kokonaisuudessaan, siten että siinä ei saa ilmetä merkittäviä puutteita. Muuttujien vaikutukset moreenin vedenläpäisevyyteen voivat mennä osin ristiin niin, että hienoainespitoisuus voi olla pienempi, mutta koska tiiveys on suuri, mitatut k-arvot ovatkin pienempiä tiiviillä alueilla tai näytteillä. Toisaalta laboratorio-olosuhteissa, tiivistämisessä käytetty vesipitoisuus voi olla tiiveyttä merkittävämpi tekijä mitatun vedenläpäisevyyden kannalta. Moreenin vedenläpäisevyyteen vaikuttavat tekijät ovat näin riippuvaisia toisistaan.

Moreenilla ja erityisesti sen saviosuudella havaittiin olevan taipumusta eroosiolle, sen joutuessa ilmakehän alaiseksi laboratorio-olosuhteissa. Työskentelymenetelmillä voi siis olla huomattava vaikutus vedenläpäisevyydestulokseen. Huomioitavia asioita olivat esimerkiksi kyllästystapa, kyllästysaika ja riittävä näytteenoton syvyys. Työskentelymenetelmiin vaikuttamalla, samalle moreeninäytteelle saatiin yli 1000-

kertainen ero vedenläpäisevyyden tulokseen. Toimintatavat siis vaikuttavat saataviin vedenläpäisevyydestuloksiin ja mikäli niiden merkitystä ei ymmärretä, voidaan saada hyvin erilaiset lopputulokset testeistä eivätkä ne kuvaa välttämättä tilannetta tiivisrakenteessa.

Työstä saatuja tuloksia ei voi käyttää kohdealueen moreenin laadunvarmistukseen eikä tuloksia voida sellaisenaan hyödyntää muissa kohteissa. Työssä tehtyjä tärkeitä huomioita vedenläpäisevyyden tutkimisessa voidaan hyödyntää muissa tutkimuksissa selvittämään luotettavammin maa-aineksen vedenläpäisevyyttä.

LÄHDELUETTELO

AFRY Finland Oy. 2021a. Maa- ja pohjarakennustyöselostus. NP4 Rikastushiekka-allas.

AFRY Finland Oy. 2021b. Report of moraine in situ-tests. NP4 Tailing pond, Revision A 09/2021.

Airaksinen J. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Kirjapaino Osakeyhtiö Kaleva, Oulu, 248 s. ISBN: 951-9099-73-5

American Society for Testing and Material. 1990. ASTM D 5084-90 Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, 8 s.

Bennett M. R. & Glasser N. F. 1996. Glacial Geology – Ice Sheets and Landforms. Chatham Maritime, 364 s. ISBN 0-471-96345-3

Blohm A. F. J. 2016. Determination of hydraulic conductivities through grain-size analysis. Masters thesis, Boston, 112 s.

Carrier W. D. 2003. Goodbye, Hazen: Hello, Kozeny-Carman. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129 (11), 1054 – 1056, 3 s.

Calabar A. F. & Akbulut N. 2016. Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape [verkkodokumentti]. SpringerPlus 5:820, Turkki, 16 s. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/305073804_Evaluation_of_actual_and_estimated_hydraulic_conductivity_of_sands_with_different_gradation_and_shape [viitattu 3.11.2021]

Di Stefano C., Ferro V. & Mirabile S. 2010. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. Elsevier Ltd, 11 s.

FINCOLD. 2021. Suomen Suurpadot, tietoa yhdistyksestä [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.fincold.org/tietoa> [viitattu 3.12.2021]

Garbarino E., Orveillon G., Saveyn H. G. M., Barthe P. & Eder P. 2018. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries [verkkodokumentti]. MWEI BREF, European Commission, EUR 28963 EN, JRC Science for Policy Report, in accordance with Directive 2006/21/EC, 722 s. Saatavilla: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/inline-files/jrc109657_mwei_bref_-_for_pubsy_online.pdf [viitattu 25.11.2021]

Geologinen tutkimuskeskus. 2005. Maaperäkartan käyttöopas [verkkojulkaisu]. Espoo. Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/> [Viitattu 16.6.2021]

GruvRIDAS. 2012. Vägledning för tillämpning av Gruvindustrins riktlinjer för dammsäkerhet. Tukholma, 67 s.

Hazen A. 1892. Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their use in Filtration. 24th Annual report Massachusetts State Board of Health, 539 – 556, 17 s.

Head K. H. 1980. Manual of soil laboratory testing. Vol. 1: Soil classification and compaction tests 1. Soils – Testing – Laboratory manuals. Pentech press, Lontoo, 339 s. ISBN 0-7273-1302-9

Hillel D. 2004. Introduction to environmental soil physics. Academic press, 511 s. ISBN 0-12-348655-6

Hirvas H. 1991. Geological Survey of Finland, Pleistocene stratigraphy of Finnish Lapland [verkkodokumentti]. Geologian tutkimuskeskus, Bulletin 354, Espoo, 130 s. Saatavilla: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_354.pdf [viitattu 22.10.2021]

Hirvas H., Alfthan A., Pulkkinen E., Puranen R. & Tynni R. 1976. Raportti malminetsintää palvelevasta maaperätutkimuksesta Pohjois-Suomessa vuosina 1972 – 1976 [verkkodokumentti]. Tutkimusraportti N:o 19, Espoo, 58 s. Saatavilla: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_019.pdf [viitattu 22.10.2021]

Hong L. 2008. Optimization and management of material in earthwork construction [verkkodokumentti]. Chapter 4: Permeability of compacted glacial till related to validation prediction with the enhanced integrated climatic model (EICM), Iowa, 12 s. Saatavilla: <https://core.ac.uk/download/pdf/38924849.pdf#page=64> [viitattu 8.11.2021]

Härkönen I. 1997. Tutkimustyöselostus Kittilän kunnassa valtausalueilla Suurikuusikko 2 ja Rouravaa 1-10 (Kaivosrekisterinumerot 5965/1, 6160/1, 6288/1- 6288/9) Suoritetuista kultatutkimuksista vuosina 1987 – 1997 [verkkodokumentti]. Geologian tutkimuskeskus, Kittilä, 117 s. Saatavilla: http://tupa.gtk.fi/raportti/valtaus/m06_2743_97_1_10.pdf [viitattu 22.10.2021]

Isomäki E., Maijala T., Sulkakoski M., Regina T. ja Torkkel M. (toim.). 2018. Patoturvallisuusopas [verkkodokumentti]. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus raportteja 89/2012, julkaisu päivitetty 12/2018, 102 s. Saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/patoturvallisuus/opas> [viitattu 4.11.2021]

Izdebska-Mucha D. & Wójcik E. 2014. Expansivity of Neogene clays and glacial tills from central Poland. 2014. Geological Quarterly, 58(2), 281 – 290, Puola, 9 s.

Jantzer I. 2009. Critical hydraulic gradients in tailing dams [verkkodokumentti]. Comparison to natural analogies, Ruotsi, 148 s. Saatavilla: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999159/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 9.11.2021]

Johansson P. & Kujansuu R. 2005. Pohjois-Suomen maaperä: maaperäkarttojen 1:400 000 selitys [verkkodokumentti]. Vammalan Kirjapaino Oy. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. Saatavilla: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_046.pdf [Viitattu 16.6.2021]

Jääskeläinen R., 2014. Geotekniikan perusteet. Tammertekniikka. 4. painos. Porvoo, 387 s. ISBN 978-952-5491-50-0.

Kalliainen A., Luomala H., Jäniskangas T., Nurmikolu A. & Kolisoja P. 2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiiveys ja kantavuustutkimus [verkkodokumentti]. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. Liikennevirasto, Helsinki, 156 s. saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf [viitattu 17.7.2021]

Kohonen E. 2015. Kaivosaltaiden geotekninen suunnittelu rakentamisen laadunvalvonta ja varautuminen häiriötilanteisiin [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://docplayer.fi/27929276-Kaivosaltaiden-geotekninen-suunnittelu-rakentamisen-laadunvalvonta-ja-varautuminen-hairiotilanteisiin.html> [viitattu 2.12.2021]

Koivisto M. (toim.) 2004. Jääkaudet. GTK ja WSOY. Porvoo, 233 s. ISBN 951-0-29101-3.

Konert M. & Vandenberghe J. 1997. Comparion of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for underestimation of clay fraction. *Sedimentology* (1997) 44, 523 – 535, Hollanti, 13 s.

Korhonen K. H. & Gardemeister R. 1971. Geotekninen kaivuuluokitus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Geotekniikan laboratorio, Tiedonanto n:o 1. Otaniemi, 112 s.

Korhonen K. H., Gardemeister R., & Tammirinne, M. 1974. Geotekninen maaluokitus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 14. Otaniemi, 20 s. ISBN 951-38-006-2.

Korkiala-Tanttu L., Juvankoski M., Kivikoski H., Eskola P. & Kiviniemi M. 2008. Moreeni tehokäyttöön!. HUUMA, heikkolaatuisen luonnonmateriaalien hyötykäytön tehostaminen rakentamisessa [verkkodokumentti]. VTT Tutkimusraportti, Espoo 74 s. Saatavilla: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2008/HUUMA_Final.pdf [Viitattu 17.7.2021]

Kujansuu R. 1972. Geological Survey of Finland, On landslides in Finnish Lapland [verkkodokumentti]. Geologinen tutkimuslaitos Bulletin 256, Otaniemi 22 s. Saatavilla: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_256.pdf [viitattu 16.7.2021]

Latvala J. 2018. Radan kuivatuksen toimivuuden arviointi ja parantaminen olemassa olevilla radoilla [verkkodokumentti]. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 50/2018. Liikennevirasto, Helsinki, 141 s. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-50_radankuivatuksen_web.pdf [viitattu 19.10.2021]

Liikenneviraston ohjeita. 2015. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Suunnitteluvaiheen ohjaus [verkkodokumentti]. Liikenneviraston ohjeita 10/2015, Helsinki, 116 s. Saatavilla: <https://docplayer.fi/9187089-Geotekniset-tutkimukset-ja-mittaukset.html> [viitattu 8.11.2021]

Llovet X., Moy A., Pinard P. T. & Fournelle J. H. 2020. Electron probe microanalysis: a review of recent developments and applications in materials science and engineering. Progress in materials science, Elsevier Ltd, 192 s.

Lopez A., Gustavsson L. & Korkiala-Tanttu L. 2012. Comparison between hydrometer and laser diffraction methods in determination of clay content in fine-grained soils [verkkodokumentti]. IOP publishing, 11 s. Saatavilla: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/710/1/012012/pdf> [viitattu 22.10.2021]

Macdonald A. M., Maurice L., Dobbs M. R., Reeves H. J. & Auton C. A. 2012. Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment. Journal of Hydrology 434 – 435, Oxford, 130 – 141 s.

Mohanty B. P., Kanwar R. S. & Everts C. J. 1994. Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil. Soil Science Society of America Journal 58, 672 – 677 s.

Odong J. 2008. Evaluation of Empirical Formulae for Determination Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. The Journal of American Science, 4(1), Kiina, 6 s.

Orzechowski M., Smólczyński S., Długosz J. & Pozniak P. 2014. Measure of text of soils formed from glaciolimnic sediments by aerometric method, pipette method and laser diffraction method [verkkodokumentti]. Soil science annual Vol. 65 No. 2/2014 72 – 79, Puola, 8 s. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/286892527_Measurements_of_Texture_of_Soils_Formed_from_Glaciolimnic_Sediments_by_Areometric_Method_Pipette_Method_and_Laser_Diffraction_Method [viitattu 22.10.2021]

Paasonen-Kivekäs M., Peltomaa R., Vakkilainen P. & Äijö H. (toim.) 2016. Maan vesi- ja ravinetalous, Ojitus, kastelu ja ympäristö [Verkkodokumentti]. Salaojayhdistys ry, Helsinki, 489 s. Saatavilla: https://salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/05/web_maanvesijaravinnetalous_B5_2016.pdf [19.10.2021]

Peltoniemi-Taivalkoski A. & Sarala P. 2009. Maaperän geokemialliset ja stratigrafiset tutkimukset Suurikuusikossa, Kittilän kaivoksella [verkkodokumentti]. Geologian tutkimuskeskus, Kittilä 30 s. Saatavilla: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/p23_4_2009_25.pdf [viitattu 22.10.2021]

Päällystealan neuvottelukunta. 2002. PANK-2103 Rakeisuudenmäärittäminen, Hydrometrikoe, 10 s.

Rakennustieto 2021. InfraRYL [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/palvelut/tietoa-rakentamiseen/ryl/infraryl> [viitattu 3.12.2021]

Rankama K. (toim.), Aurola E., Neuvonen K. J., Okko V., Saksela M., Simonen A. & Soveri U. 1964. Suomen Geologia. Helsinki: Kirjayhtymä, 414 s.

Rantamäki M., Jääskeläinen R., Tammirinne M., 1979. Geotekniikka. 22. muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto Oy, 301 s. ISBN 978-951-672-257-6.

Rayhani M.H.T., Yanful E.K. & Fakher A. 2007. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. Canadian Geotechnical Journal 44(3), 276 – 283, Kanada, 8 s.

Reynolds W. D. & Elrick D. E. 1986. A Method for simultaneous In Situ Measurement in the Cadose Zone of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship. *Groundwater Monitoring & Remediation* 6, 84 – 95 s.

Ronayne M. J., Houghton T. B. & Stednick J. D. 2012. Field characterization of hydraulic conductivity in a heterogeneous alpine glacial till. *Journal of Hydrology* 458 – 459, Fort Collings, 103 – 109 s.

Ronkainen N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus 2/2012, Helsinki, 62 s. Saatavilla: <https://core.ac.uk/download/pdf/14927376.pdf> [viitattu 18.3.2021]

Roy S., Bharti R. K., Dixit M. & Chitra R. 2020. Comparison of theoretical and laboratory permeability for coarse grained soil. *Advances in computer methods and geomechanics, Lecture notes in Civil engineering* 55, Singapore, 12 s.

Saadeldin R. & Froc G. 2016. Hydraulic conductivity of a glacial clay till liner. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 76(2) 553-560, Kanada, 8 s.

Schuhmann R., Königer F. & Emmerich K. 2011. Determination of Hydraulic conductivity based on (soil) - moisture content of fine grained soils [verkkodokumentti] In book: *Hydraulic conductivity – issues, determination and applications* 165 – 188, Saksa, 24 s. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/221920213_Determination_of_Hydraulic_Conductivity_Based_on_Soil_-_Moisture_Content_of_Fine_Grained_Soils [viitattu 9.11.2021]

Silva I. 2019. Sufficion of Glacial Till Dam Cores [verkkodokumentti] An experimental Investigation, Ruotsi, 125 s. Saatavilla: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1269001/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 9.11.2021]

Salverda A. P. & Dane J. H. 1993. An examination of the Guelph-permeameter for measuring the soil's hydraulic properties. *Geoderma* 57, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 405 – 421 s.

Slitchter C. S. 1905. Field measurements of the rate of movement of underground waters [verkkodokumentti]. United States Geological Survey, Water-Supply and Irrigation paper No. 140, Washington, 141 s. Saatavilla: <https://pubs.usgs.gov/wsp/0140/report.pdf> [viitattu 3.11.2021]

Soilmoisture 2012. Guelph-permeameter model 2800K1 operation instructions [verkkodokumentti]. Soilmoisture equipment corp, California, 60 s. Saatavilla: https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2800_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf [viitattu 4.8.2021]

Suomen geoteknillinen yhdistys. 1985. GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1. luokituskokeet. Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki, 107 s. ISBN 951-676-308-1.

Suomen geoteknillinen yhdistys. 2008. Ympäristögeotekniikan perusteet [verkkodokumentti]. 115 s. Saatavilla: <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/ymperiaeristoegeotekniikan-perusteet.pdf> [viitattu 4.11.2021]

Suomen geoteknillinen yhdistys. 2012. Soveltamisohje: ISO-maaluokituksen soveltamisohje Suomessa [verkkodokumentti]. 25 s. Saatavissa: <https://docplayer.fi/25715698-Soveltamisohje-iso-maaluokituksen-soveltamisohje-suomessa.html> [viitattu 11.3.2021]

Suomen rakennusinsinööriliitto. 1979. RIL 123 Vesirakenteiden suunnittelu. K. J. Gummerrus kirjapaino Oy. Helsinki, 377 s. ISBN 951-758-015-0

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 1985. RIL 157-1 Geomekaniikka I. Otapaino. Espoo, 479 s. ISBN 951-758-086-X

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 1995. RIL 156 Maarakennus. K. J. Gummerrus Kirjapaino Oy. Jyväskylä, 479 s. ISBN 951-758-343-5

Suomen Rakennusinsinööriliitto. 2021. Julkaisut [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.ril.fi/fi/julkaisut.html> [viitattu 3.12.2021]

Suomen standardoimisliitto SFS. 2007. SFS-EN 1997-2:2007 + AC:2010 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Pohjatutkimus ja koestus, 154 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2008. SFS-käsikirja 179-2 Geotekinen tutkimus ja koestus. Osa 2: Maan laboratoriokokeet 2008, 216 s. ISBN 978-952-5650-59-4

Suomen standardoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN 13286-2 Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory density and water content. Proctor compaction, 29 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2015. SFS-EN ISO 17892-1:2015 Geotekninen tutkimus ja testaus. Maan laboratoriokokeet. Osa 1: Vesipitoisuuden määrittäminen, 17 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2016. SFS-EN ISO 17892-4:2016 Geotekninen tutkimus ja testaus. Maan laboratoriokokeet. Osa 4: Rakeisuuden määrittäminen, 39 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2018. SFS-EN 13361:2018 Geosynthetic barriers. Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams, 56 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2019. SFS-EN ISO 11274:2019 Soil quality. Determination of the water-retention characteristic. Laboratory methods. 31 s.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2019. SFS-EN ISO 17892-11:2019 Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 11: Permeability tests (ISO 17892-11:2019), 29 s.

Suomen ympäristökeskus. 2002. Kaatopaikan tiivistysrakenteet [verkkodokumentti]. Ympäristöopas 36, Helsinki, 145 s. Saatavilla: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41085/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas_36.pdf?sequence=1 [viitattu 4.11.2021]

Suomen ympäristökeskus. 1995. Suositus vedenläpäisevyyden mittausmenetelmiksi. TEKES:n ympäristötekniikkaprojekti, Luonnos 15.5.1995, 23 s.

Suomen ympäristökeskus. 2008. Kaatopaikkojen käytöstä poistaminen ja jälkihoito [verkkodokumentti]. Ympäristöhallinnon ohjeita 1/2008, Helsinki, 158 s. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/41544/SYKE_OH_1_2008.pdf?sequence=2 [viitattu 4.11.2021]

Tielaitos 1993. Moreeni ja sen käyttö [verkkodokumentti]. Tielaitoksen selvityksiä 20/1993, Geokeskus, Oulun kehittämissyksikkö, 59 s. Saatavilla: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/138481/3681tie.pdf;jsessionid=A05672E33EBFD9742F6579775C4B4A18?sequence=1> [viitattu 8.11.2021]

Tuller M. & Or D. 2004. Water retention and characteristic curve [verkkodokumentti]. Encyclopedia of soils in the environment, Oxford, 278 – 289 s. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/251875388_Water_retention_and_characteristic_curve [viitattu 19.10.2021]

Tuomela A. 2016. Synteettisten materiaalit kaivosten allasrakenteiden tiivisrakenteena [verkkodokumentti]. Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmä, Oulun yliopisto, 51 s. Saatavilla: <http://docplayer.fi/18291158-Synteettiset-materiaalit-kaivosten-allasrakenteiden-tiivisrakenteena.html> [viitattu 1.12.2021]

Tuomela A., Ronkainen A.-K., Rossi P. M., Rauhala A., Haapasalo H. & Kauko K. 2021. Using Geomembrane Liners to Reduce Seepage through the Base Tailings Ponds – A Review and Framework for Design Guidelines [verkkodokumentti]. Geosciences, 2021, 11, 93, 22 s. Saatavilla: <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/2/93/htm> [viitattu 13.11.2021]

Viklander P. 1998. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 471 – 477, Ruotsi, 7 s.

Witt W. & Röthele S. 1999. Laser Diffraction – unlimited? [verkkodokumentti]. Saksa, 15 s. Saatavilla: https://archive.sympatec.com/docs/LaserDiffraction/publications/LD_1995_LDUnlimited.pdf [viitattu 22.10.2021]

Ympäristöministeriö. 2020. Opas kaivannaisjätteiden hallinnan MWEI BREF -vertailuasiakirjan parhaita käyttökelpoisia tekniikoita koskevien päätelmien soveltamiseen [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriön julkaisuja 2020:12, Helsinki, 254 s. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162281/YM_2020_12.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 3.12.2021]

Zhang Z. F., Groenevelt P. H. & Parkin G. W. 1998. The well-shape factor for measurement of soil hydraulic properties using the Guelph-permeameter. *Soil & Tillage Research* 49 (1998) 219 – 221, Elsevier Science, 3 s.



Liite 2 (1). Proctor-kokeet

Site 1, Tutkimuspiste 1

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 7,70 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,56 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,85 kN/m³

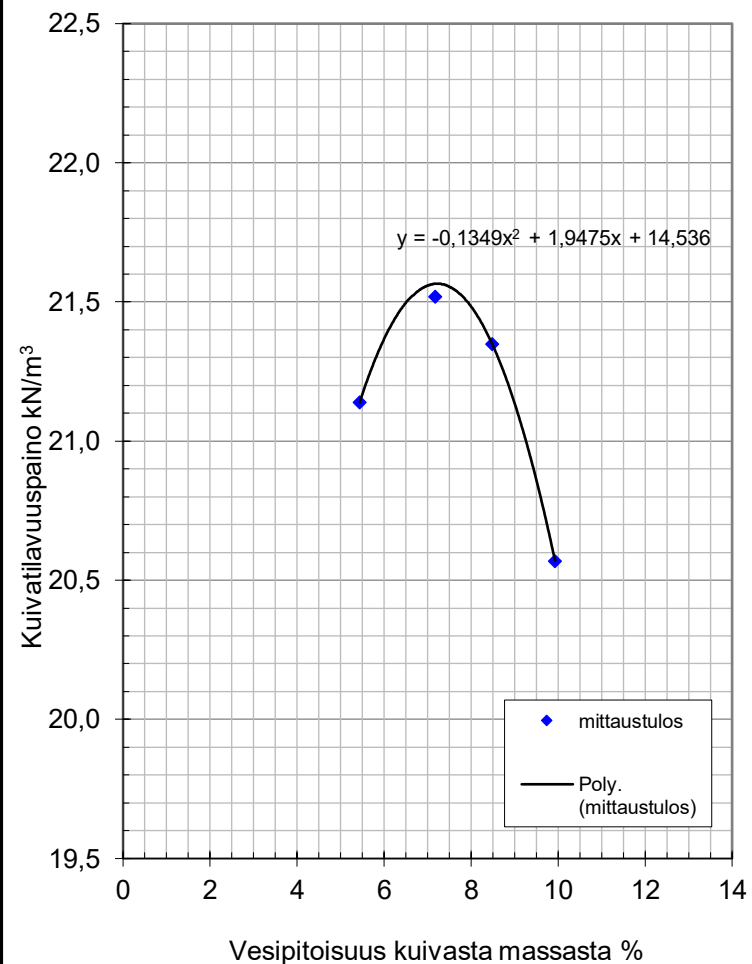
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 7,22 %

Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,66 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (2). Proctor-kokeet

Site 1, Tutkimuspiste 2

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 6,72 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,55 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,80 kN/m³

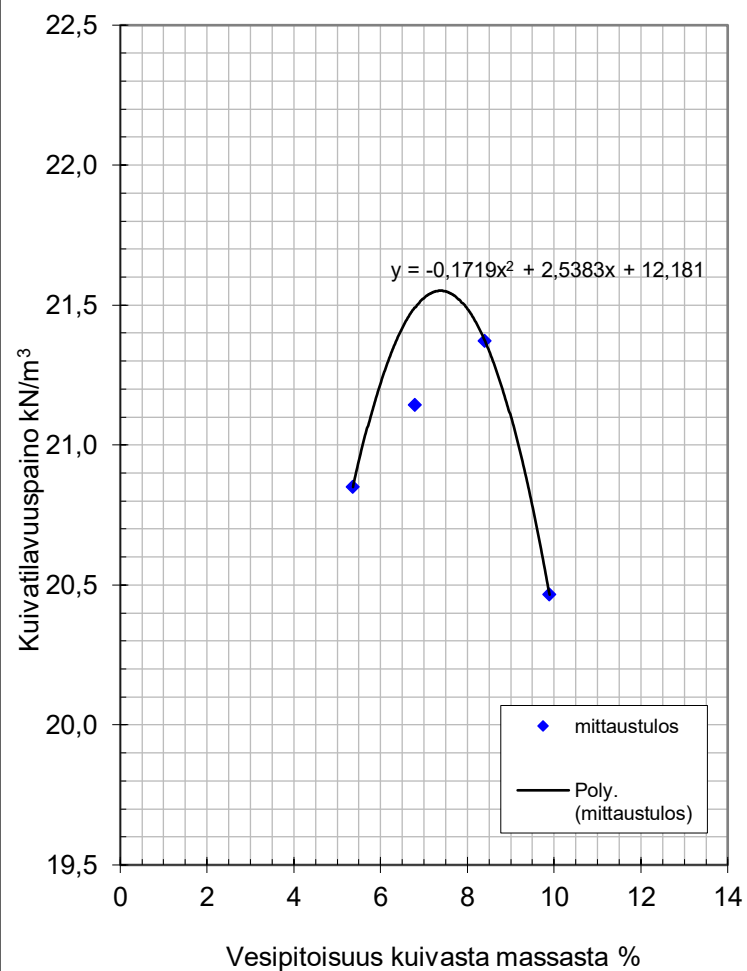
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 7,38 %

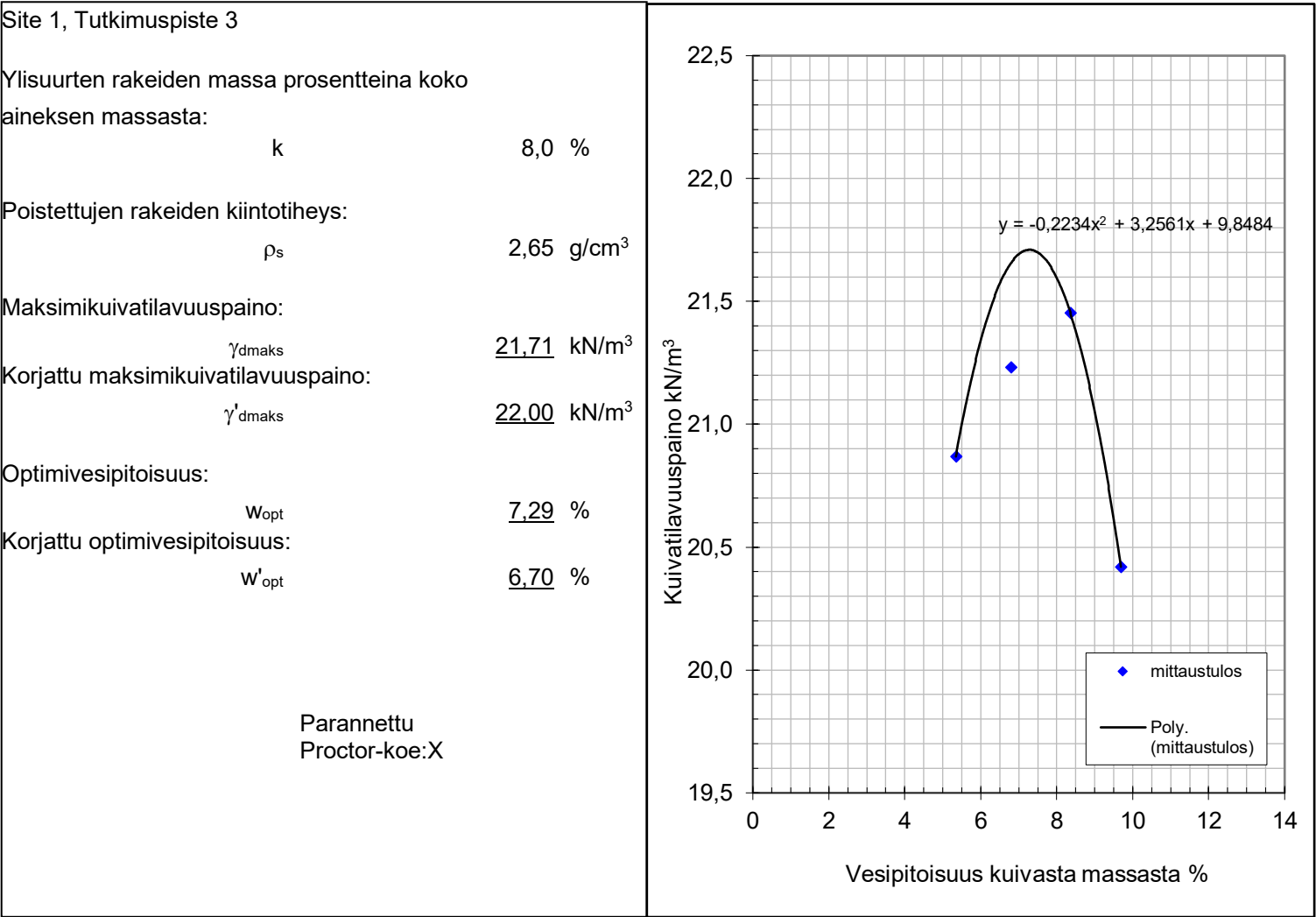
Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,89 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (3). Proctor-kokeet



Liite 2 (4). Proctor-kokeet

Site 2, Tutkimuspiste 1

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 8,37 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,52 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,83 kN/m³

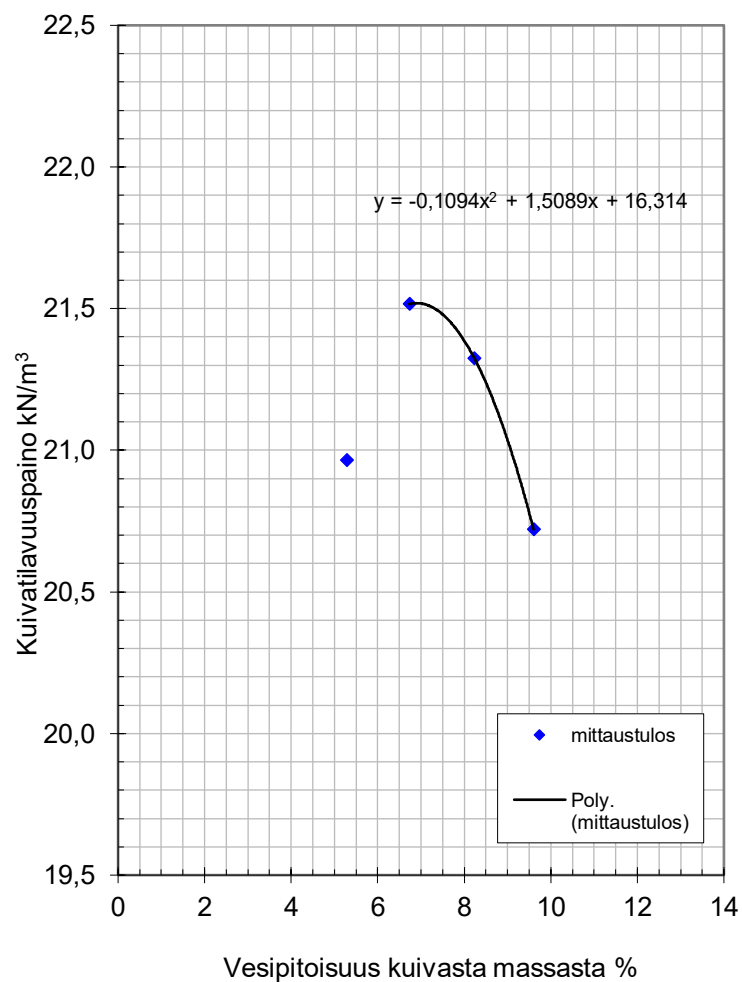
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 6,90 %

Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,32 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (5). Proctor-kokeet

Site 2, Tutkimuspiste 2

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 6,27 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,41 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,65 kN/m³

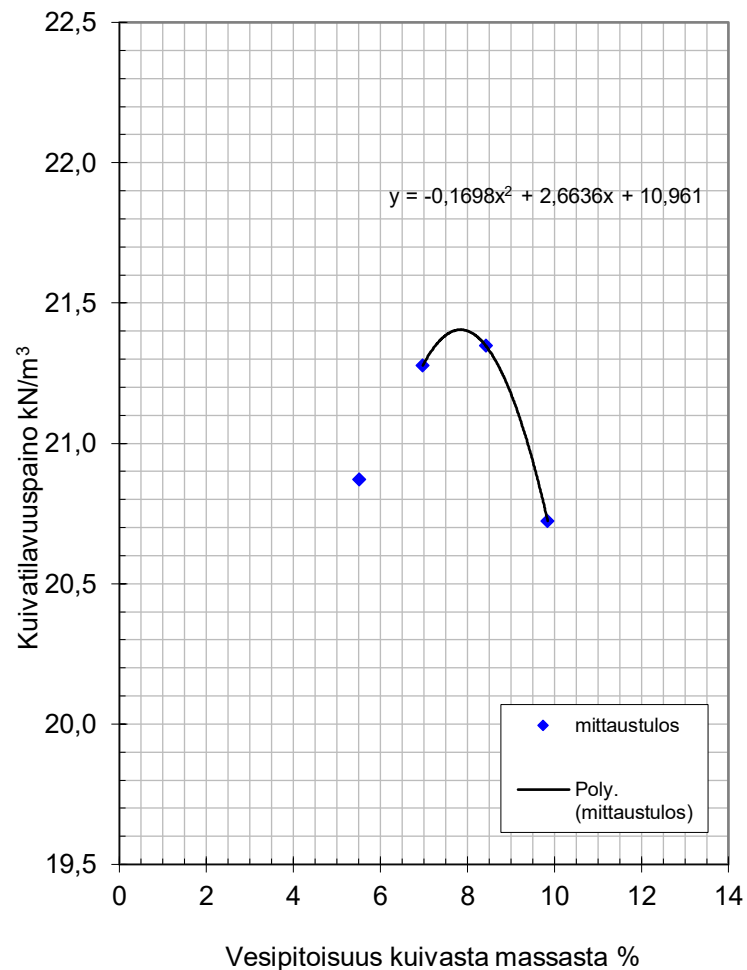
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 7,84 %

Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 7,35 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (6). Proctor-kokeet

Site 2, Tutkimuspiste 3

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 8,19 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,75 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 22,05 kN/m³

Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 6,80 %

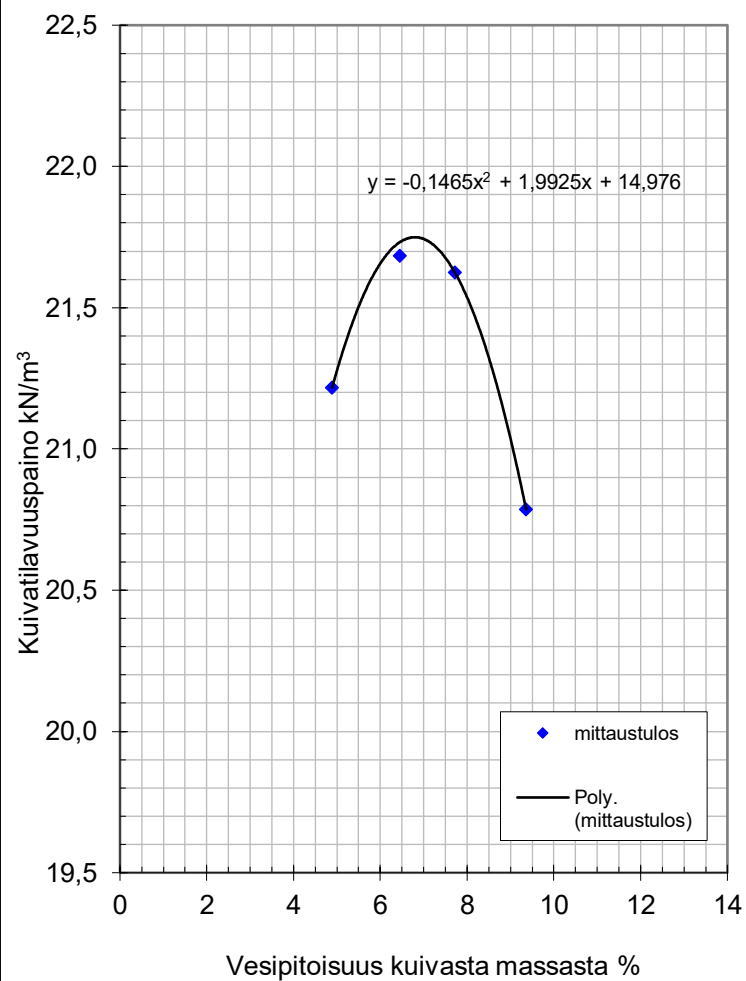
Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,24 %

Muotin tilavuus:

V 998,5 cm³

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (7). Proctor-kokeet

Site 3, Tutkimuspiste 1

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko aineksen massasta:

k 5,34 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,68 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,87 kN/m³

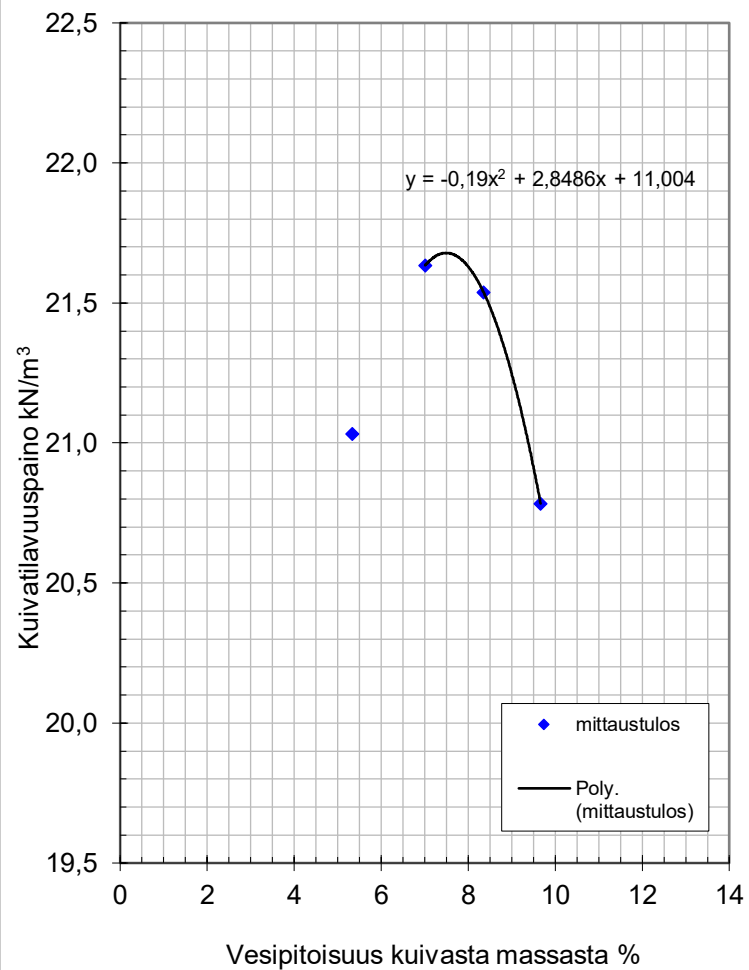
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 7,50 %

Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 7,10 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (8). Proctor-kokeet

Site 3, Tutkimuspiste 2

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko
aineksen massasta:

k 7,50 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,57 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 21,85 kN/m³

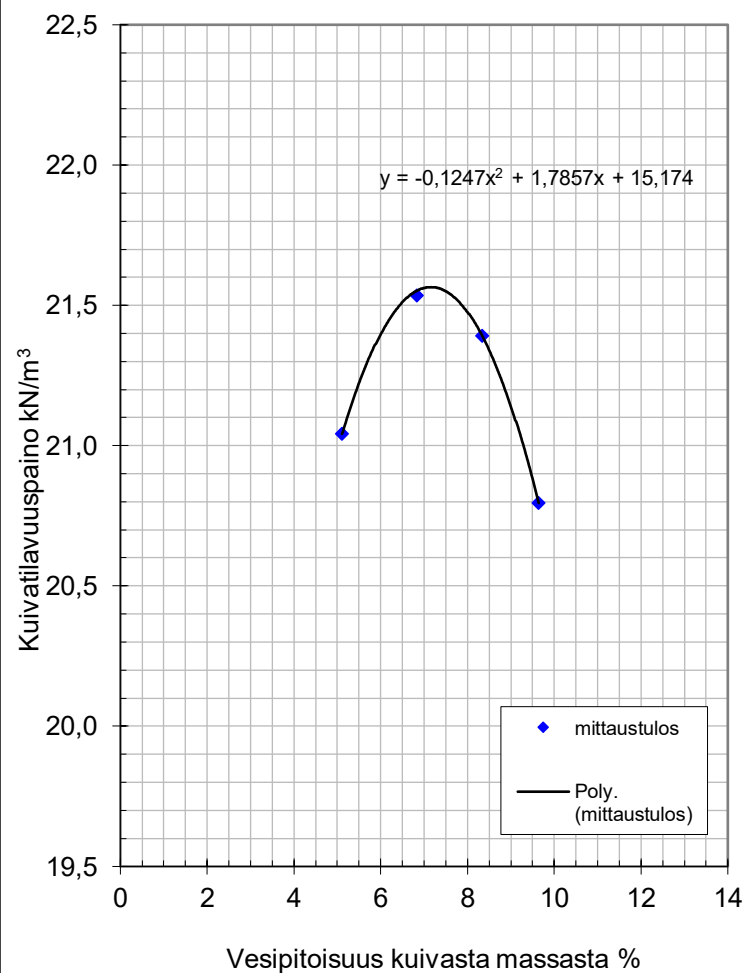
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 7,16 %

Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,62 %

Parannettu
Proctor-koe: X



Liite 2 (9). Proctor-kokeet

Site 3, Tutkimuspiste 3

Ylisuurten rakeiden massa prosentteina koko
aineksen massasta:

k 9,08 %

Poistettujen rakeiden kiintotiheys:

ρ_s 2,65 g/cm³

Maksimikuivatilavuuspaino:

γ_{dmaks} 21,72 kN/m³

Korjattu maksimikuivatilavuuspaino:

γ'_{dmaks} 22,05 kN/m³

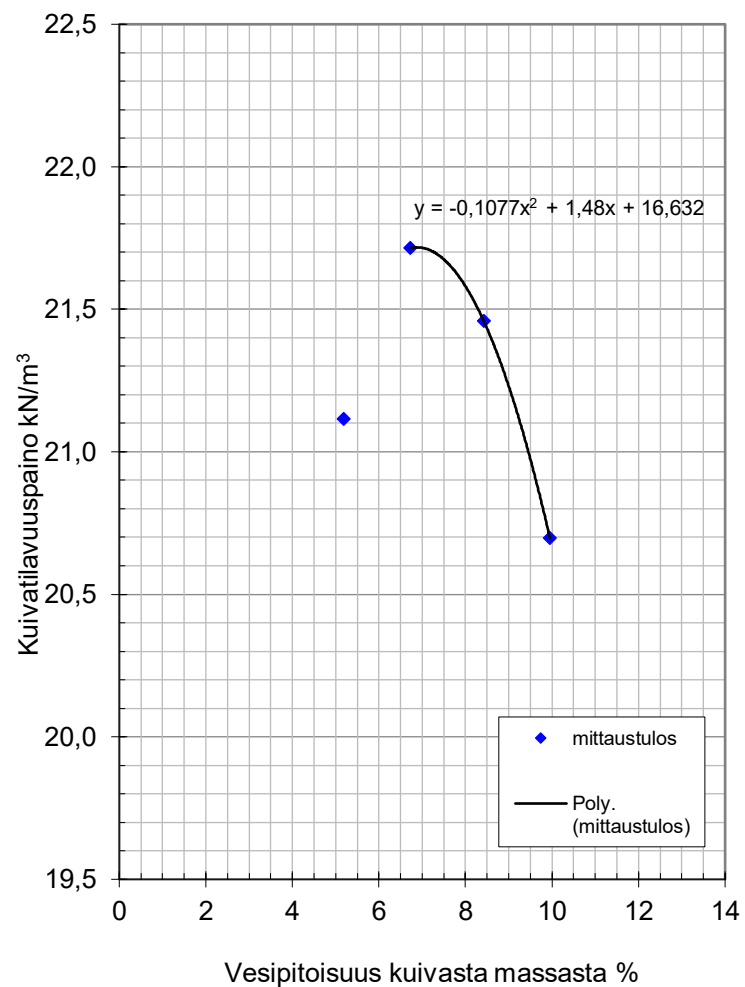
Optimivesipitoisuus:

w_{opt} 6,87 %

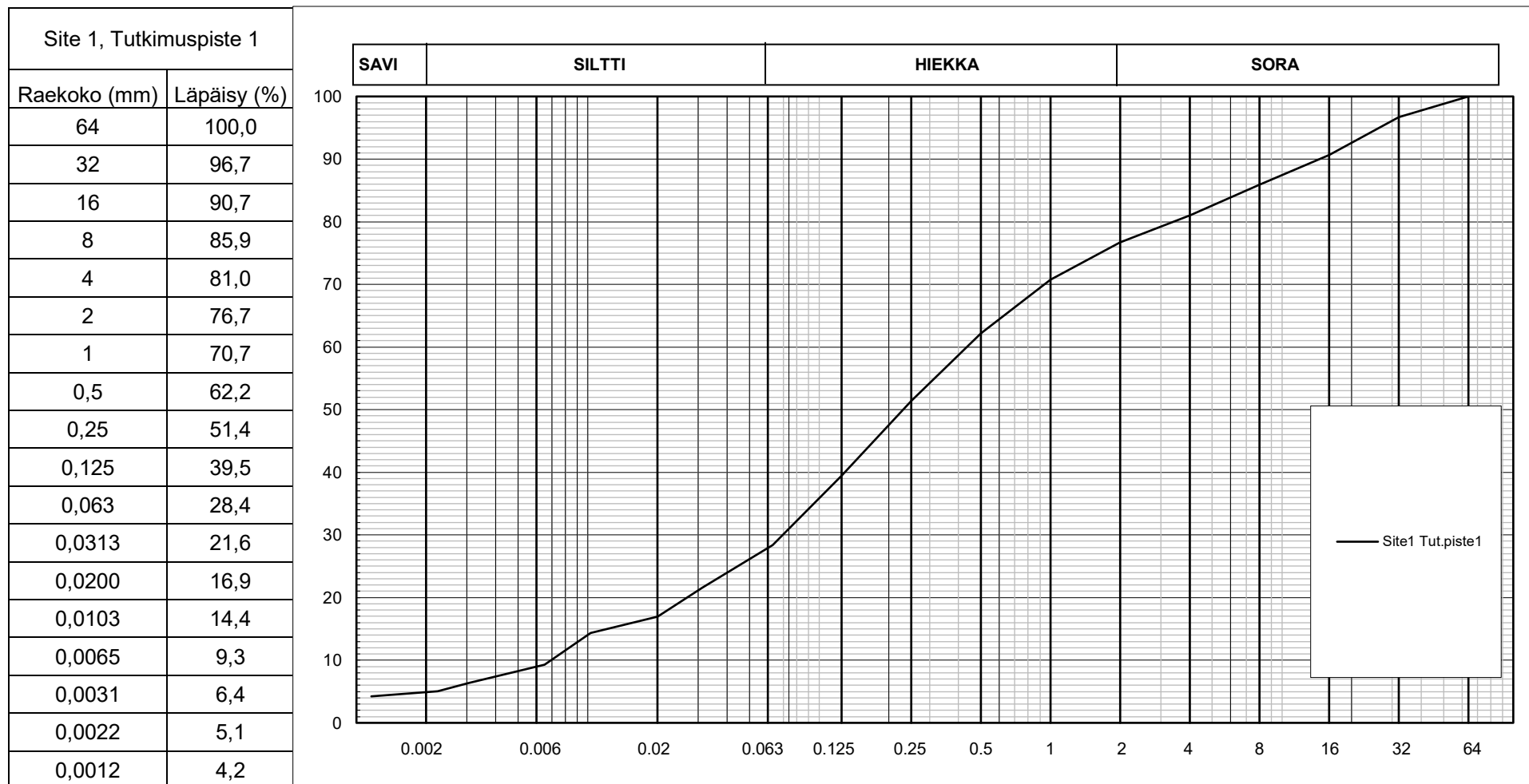
Korjattu optimivesipitoisuus:

w'_{opt} 6,25 %

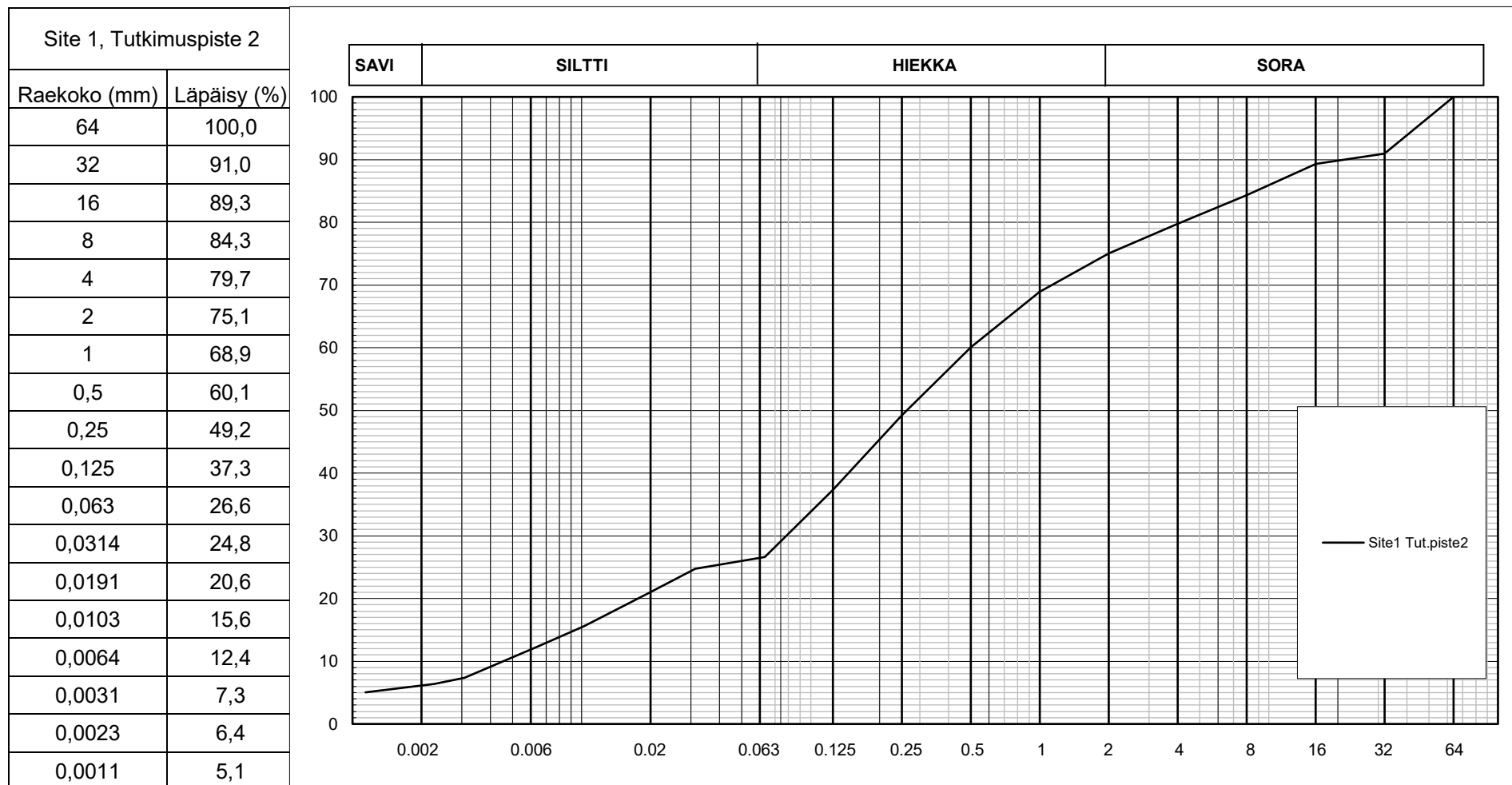
Parannettu
Proctor-koe: X



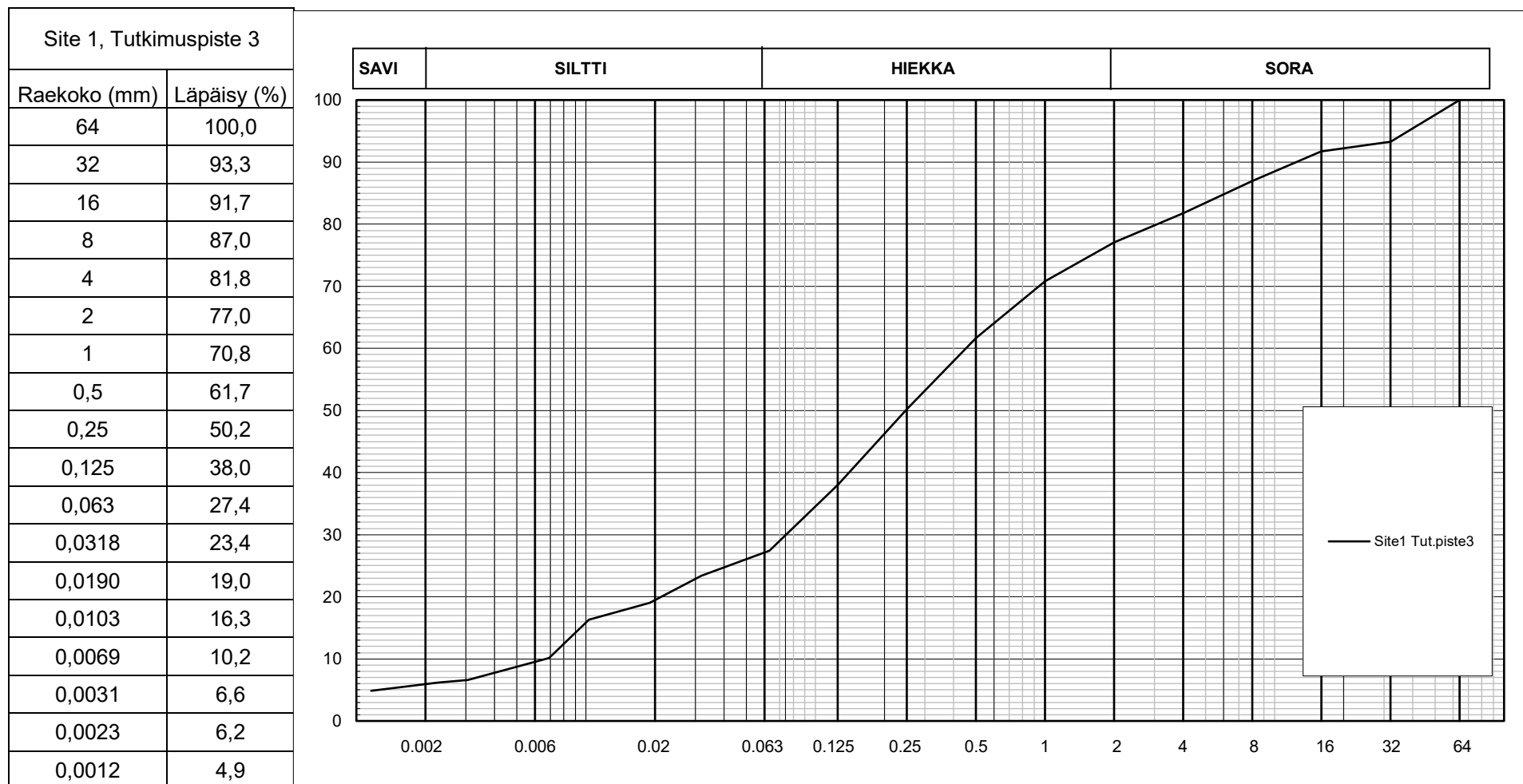
Liite 3 (1). Rakeisuuskäyrät



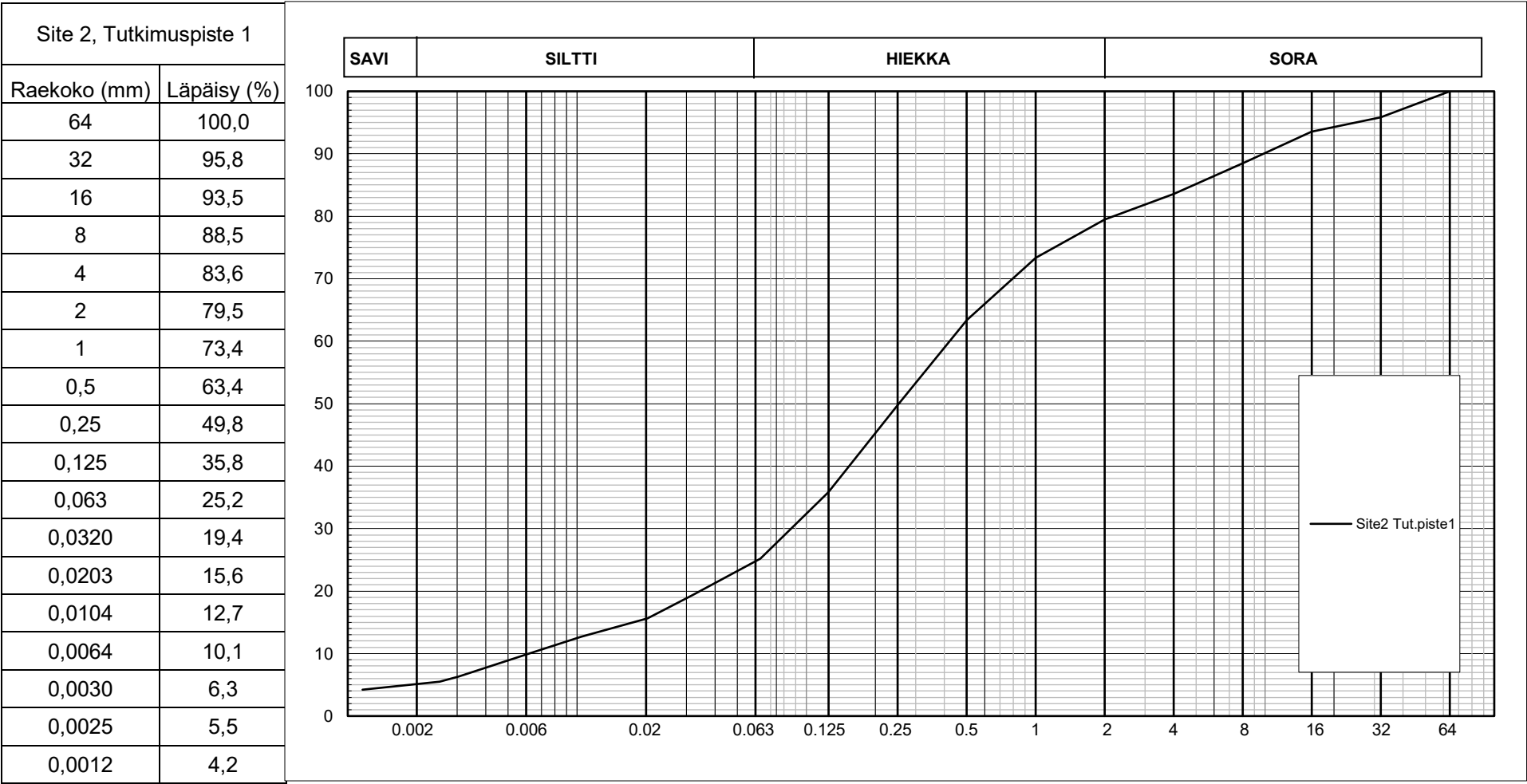
Liite 3 (2). Rakeisuuskäyrät



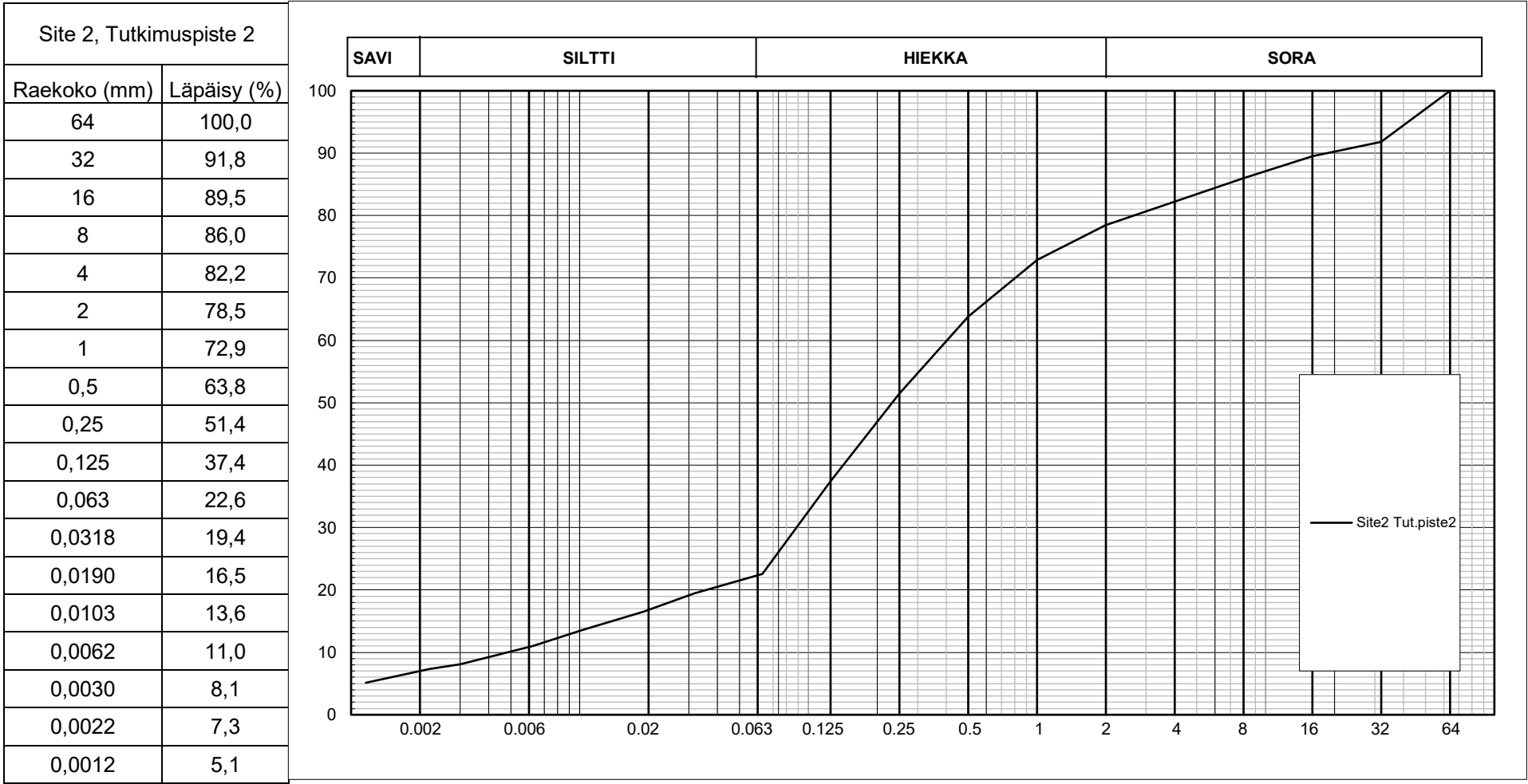
Liite 3 (3). Rakeisuuskäyrät



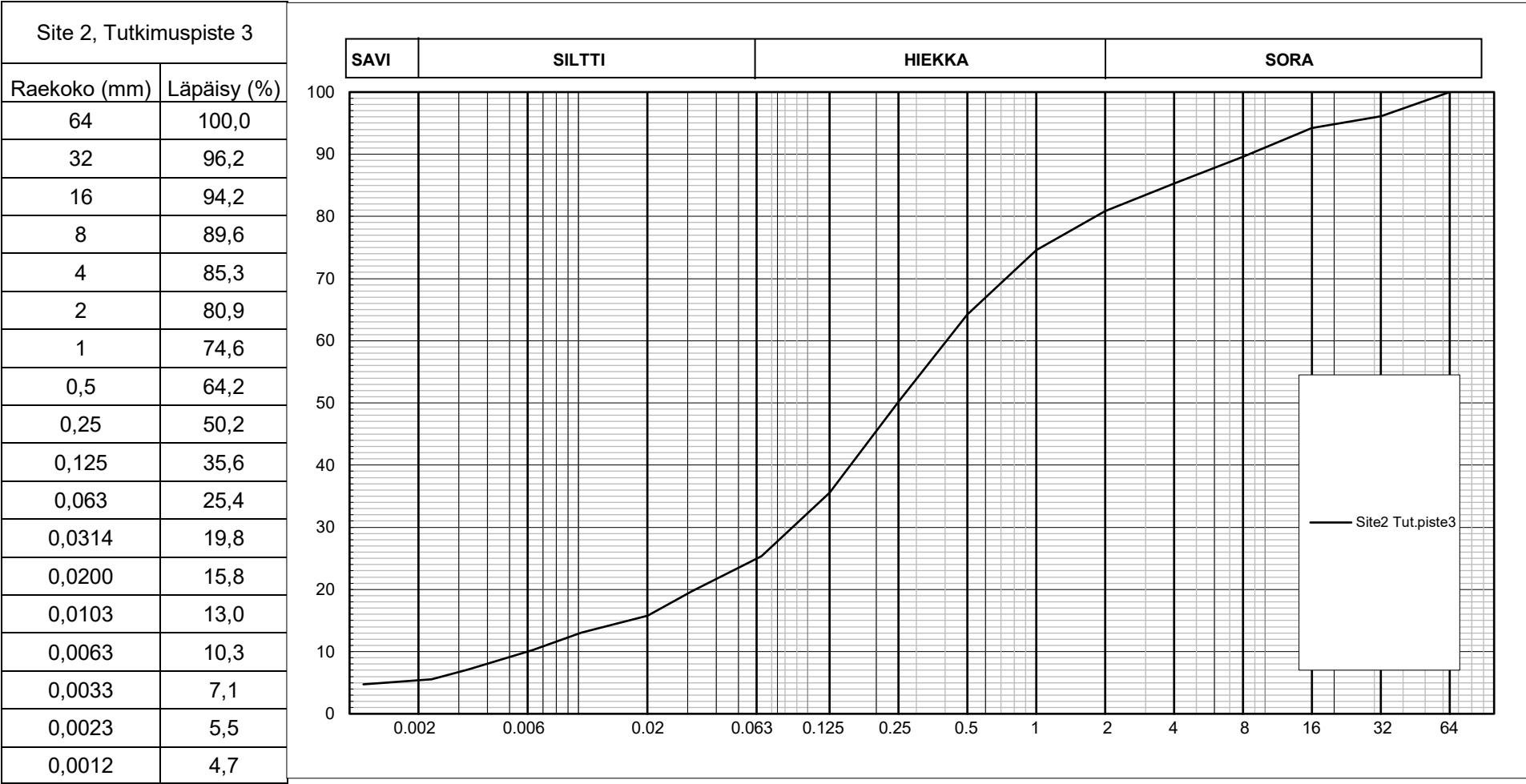
Liite 3 (4). Rakeisuuskäyrät



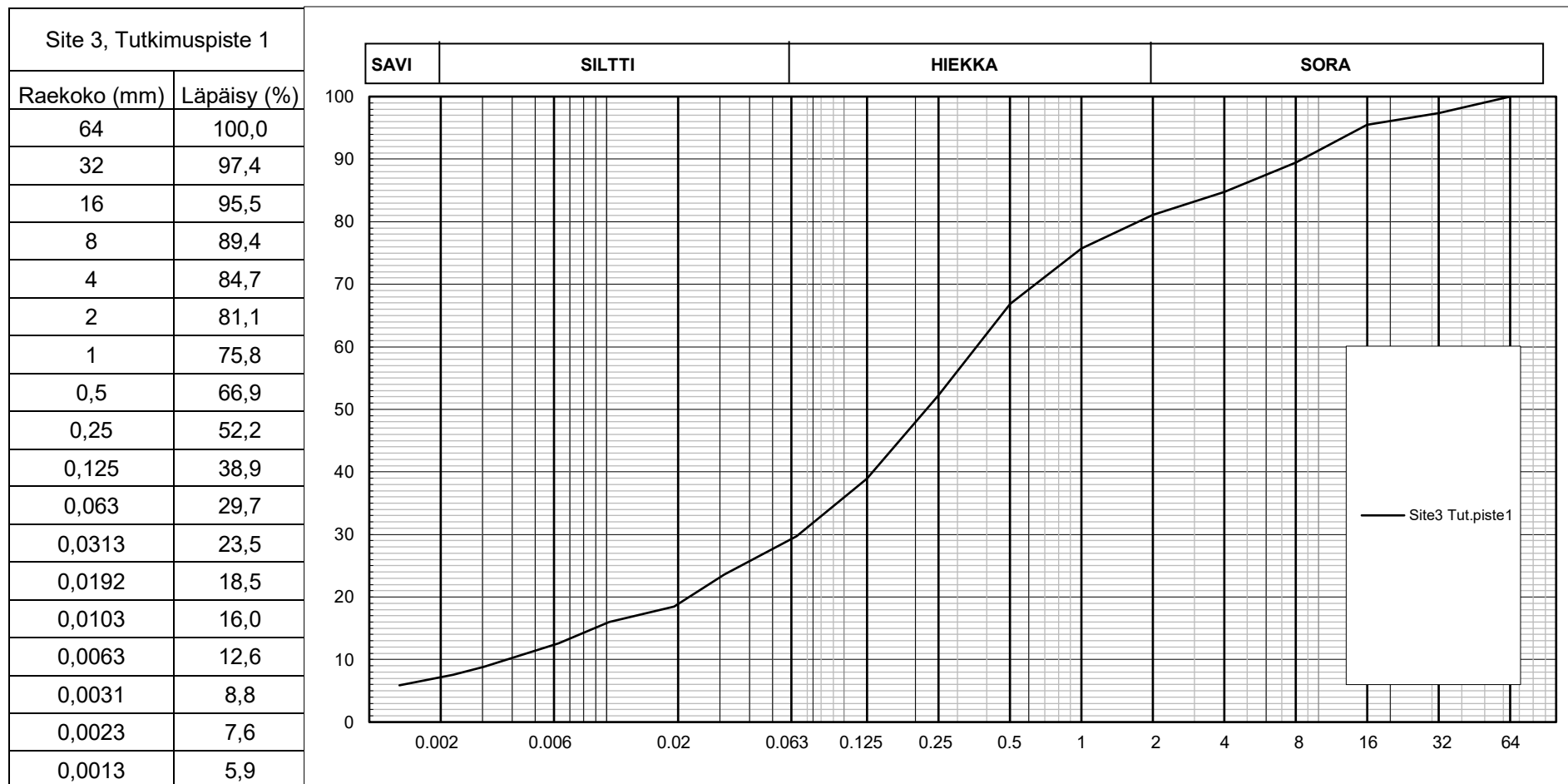
Liite 3 (5). Rakeisuuskäyrät



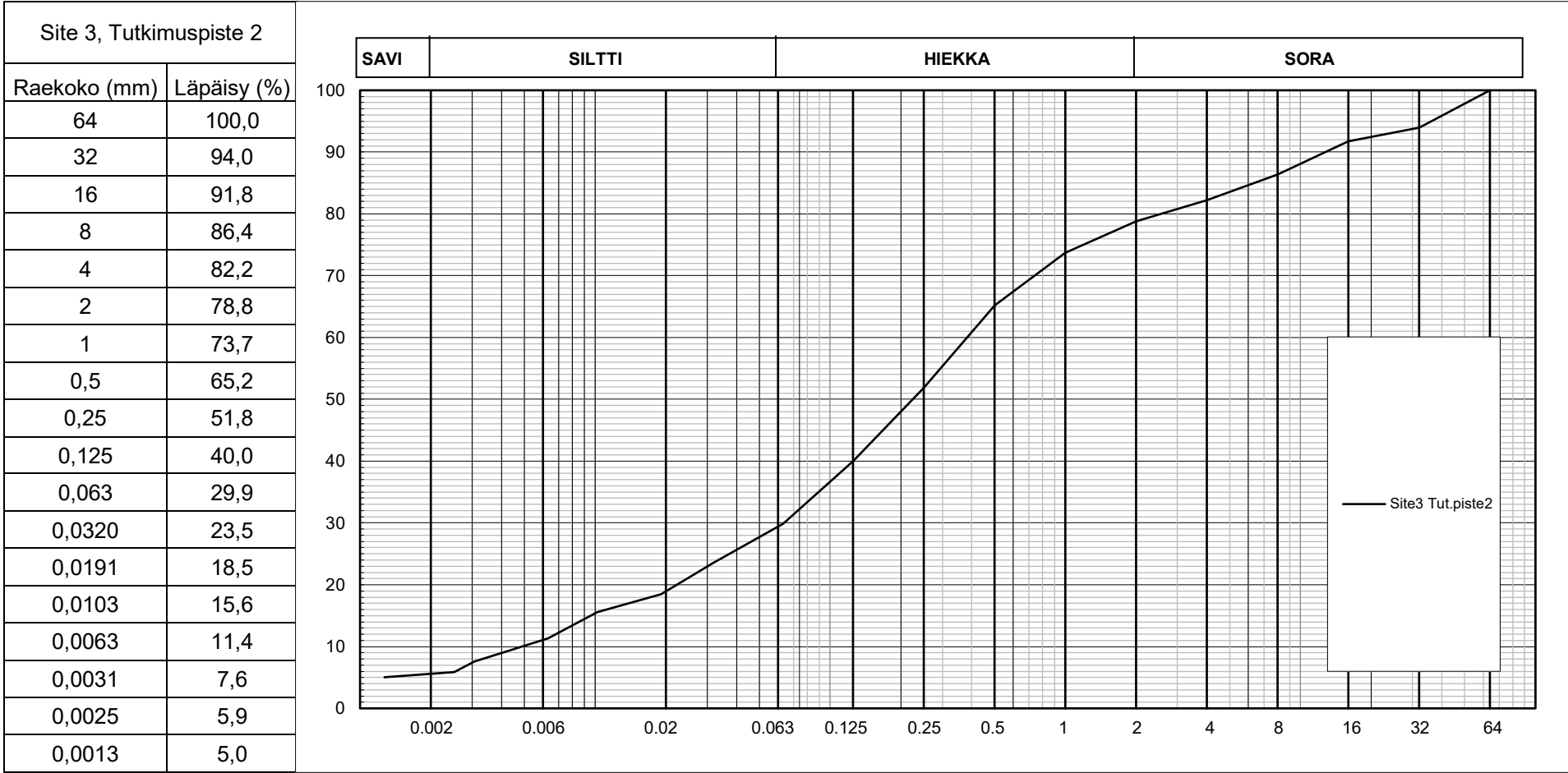
Liite 3 (6). Rakeisuuskäyrät



Liite 3 (7). Rakeisuuskäyrät

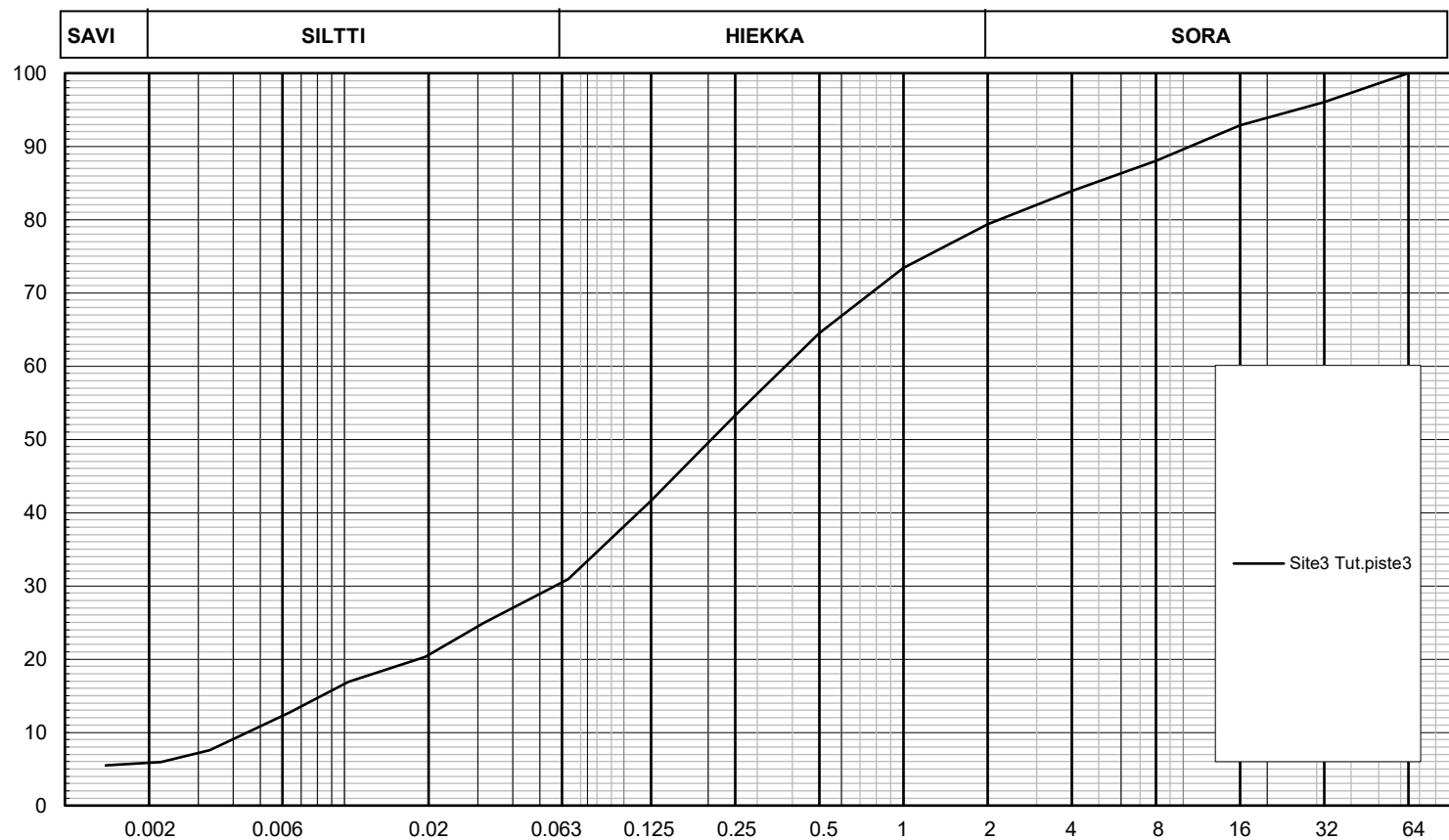


Liite 3 (8). Rakeisuuskäyrät



Liite 3 (9). Rakeisuuskäyrät

Site 3, Tutkimuspiste 3	
Raekoko (mm)	Läpäisy (%)
64	100,0
32	96,0
16	92,9
8	88,0
4	83,9
2	79,4
1	73,4
0,5	64,5
0,25	53,3
0,125	41,6
0,063	30,9
0,0315	24,9
0,0195	20,3
0,0103	16,9
0,0064	12,7
0,0033	7,6
0,0022	5,9
0,0014	5,5

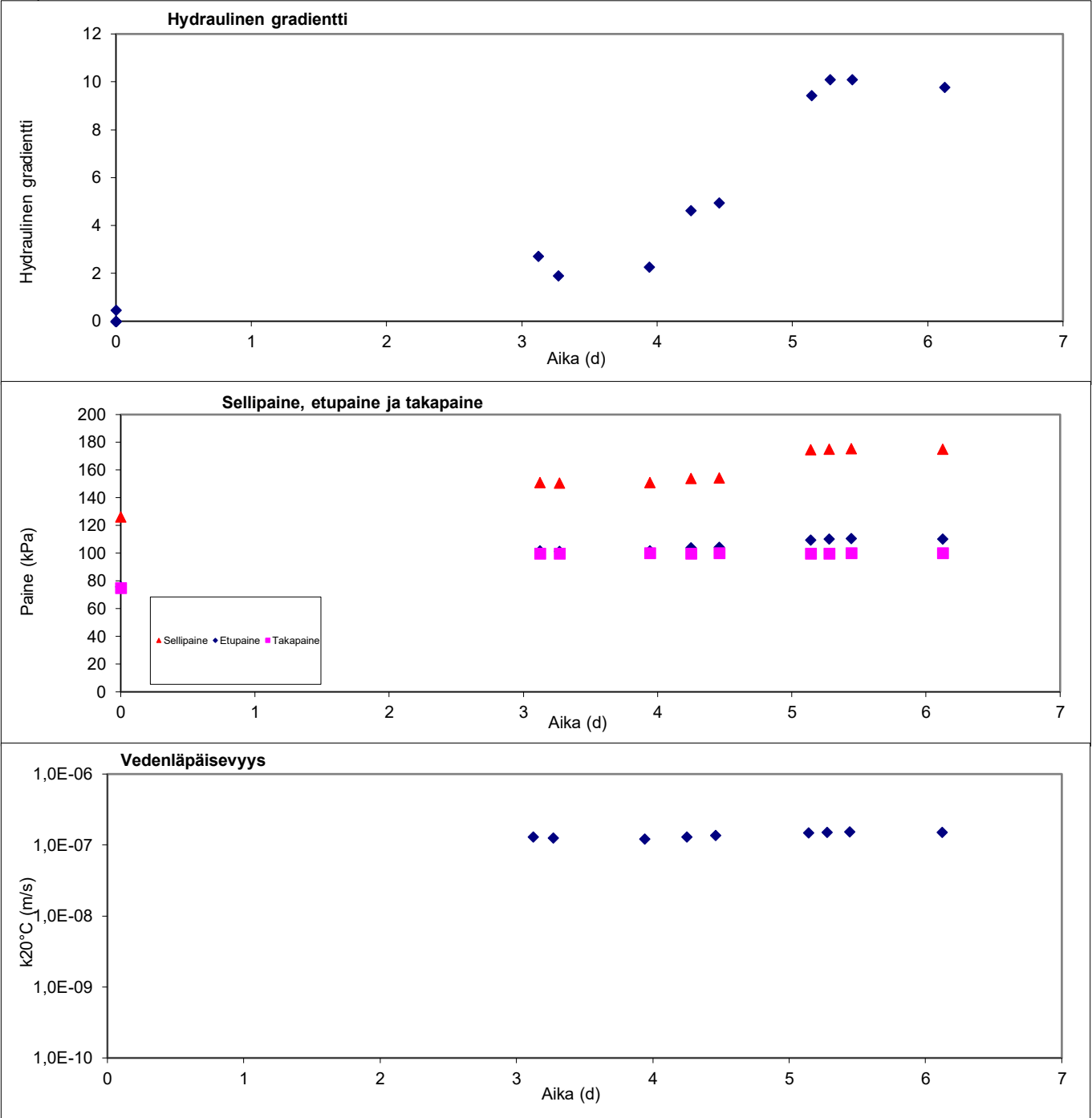


Liite 4 (1). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,5E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,22	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,56	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	108,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1858,4	g
Vesipitoisuus	7,52	%
Tilavuuspaino	20,77	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,31	kN/m3
Tiivysaste	89,58	%
Kyllästysaste	57,59	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	108,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1933,5	g
Vesipitoisuus	11,8	%
Tilavuuspaino	21,69	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,40	kN/m3
Tiivysaste	89,97	%
Kyllästysaste	91,90	%



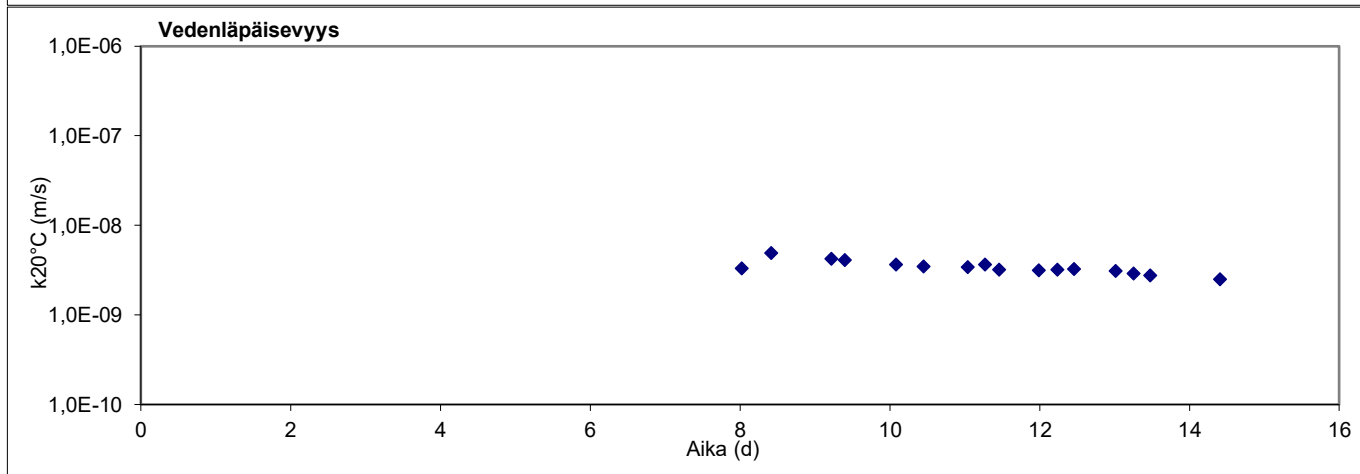
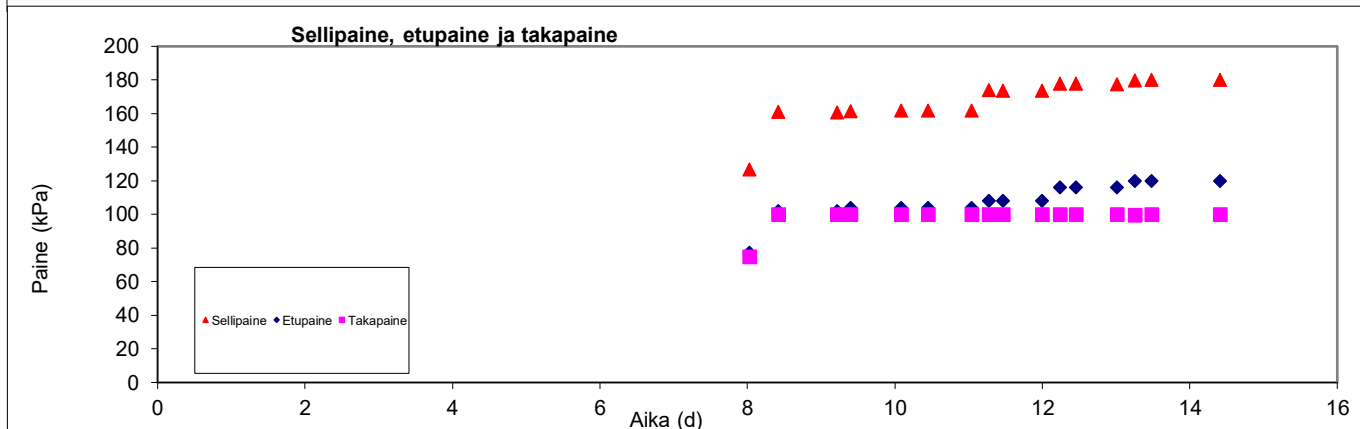
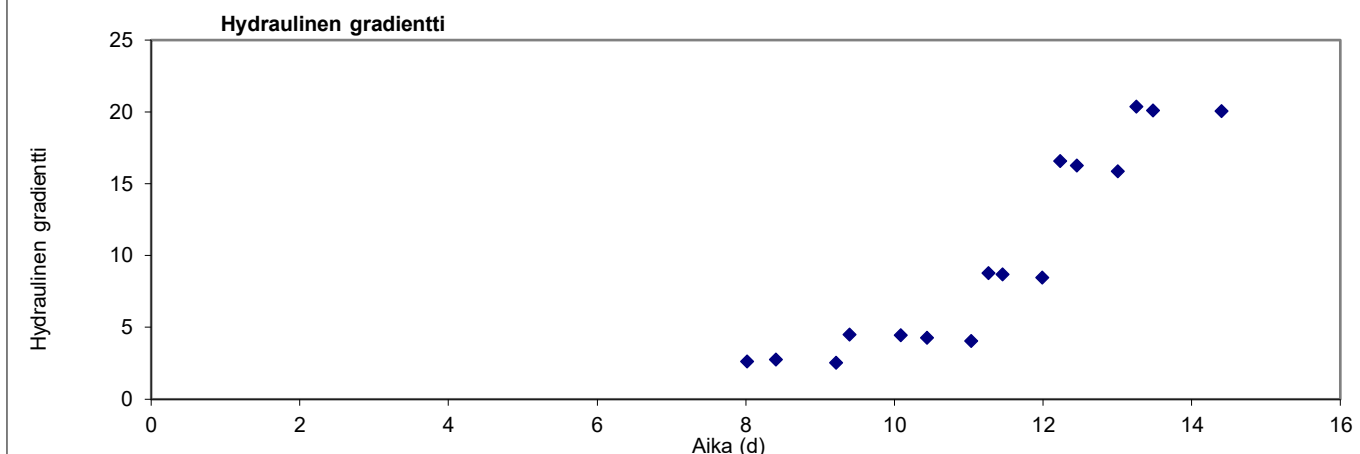
Liite 4 (2). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	2,8E-09	m/s
--------------------------	---------	-----

MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,22	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,56	kN/m ³
Kiintotiheys	2,65	t/m ³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	104,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1940,8	g
Vesipitoisuus	8,6	%
Tilavuuspaino	22,52	kN/m ³
Kuivatilavuuspaino	20,73	kN/m ³
Tiivysaste	96,17	%
Kyllästysaste	89,79	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	103,7	mm
Halkaisija	102,1	mm
Massa	1963	g
Vesipitoisuus	9,69	%
Tilavuuspaino	22,68	kN/m ³
Kuivatilavuuspaino	20,68	kN/m ³
Tiivysaste	95,91	%
Kyllästysaste	99,83	%

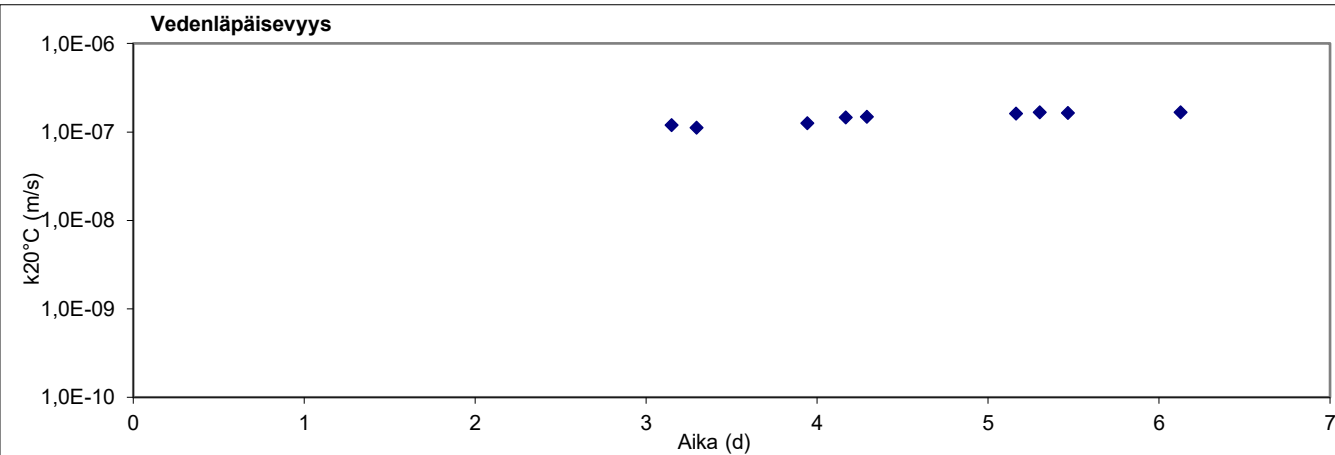
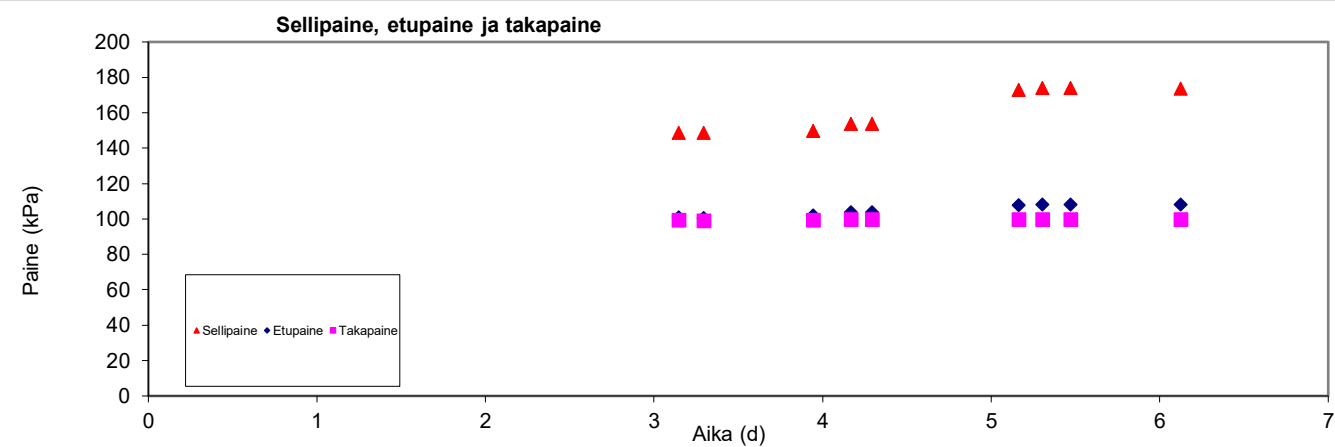
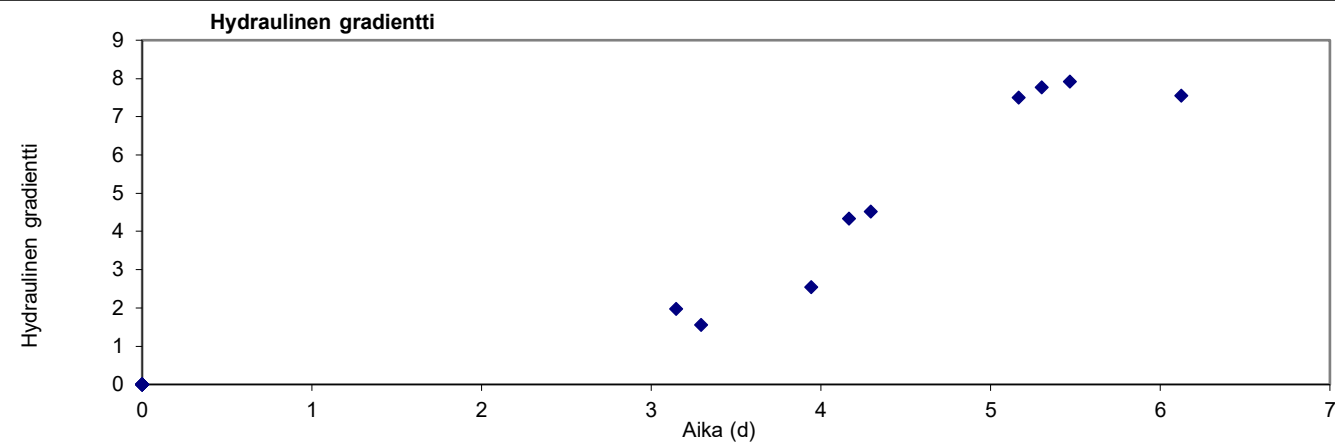


Liite 4 (3). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,6E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,16	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,57	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1852	g
Vesipitoisuus	7,37	%
Tilavuuspaino	20,58	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,17	kN/m3
Tiivysaste	88,86	%
Kyllästysaste	54,82	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1949,4	g
Vesipitoisuus	13,02	%
Tilavuuspaino	21,66	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,17	kN/m3
Tiivysaste	88,86	%
Kyllästysaste	96,84	%

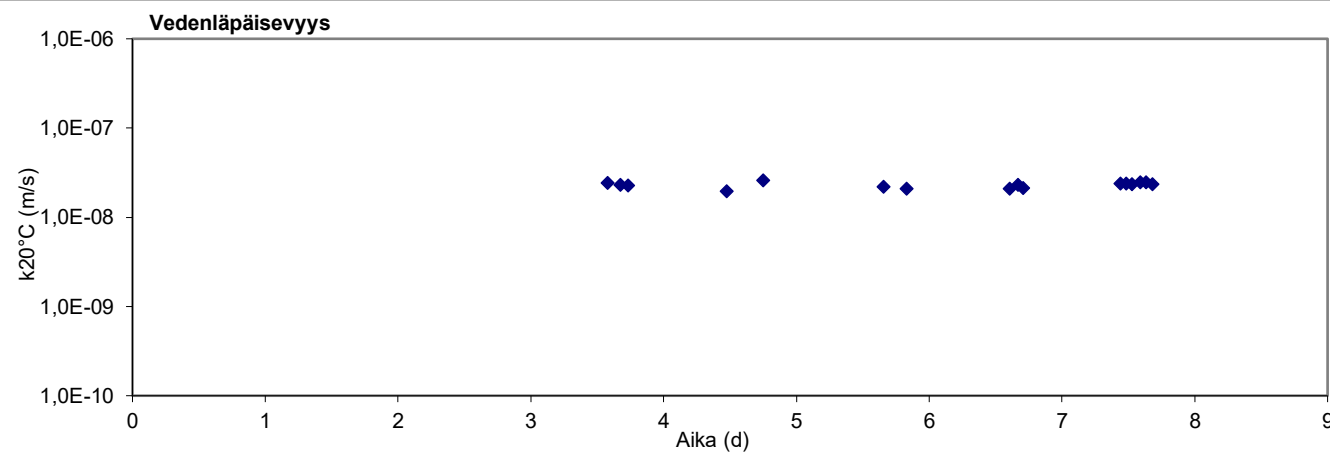
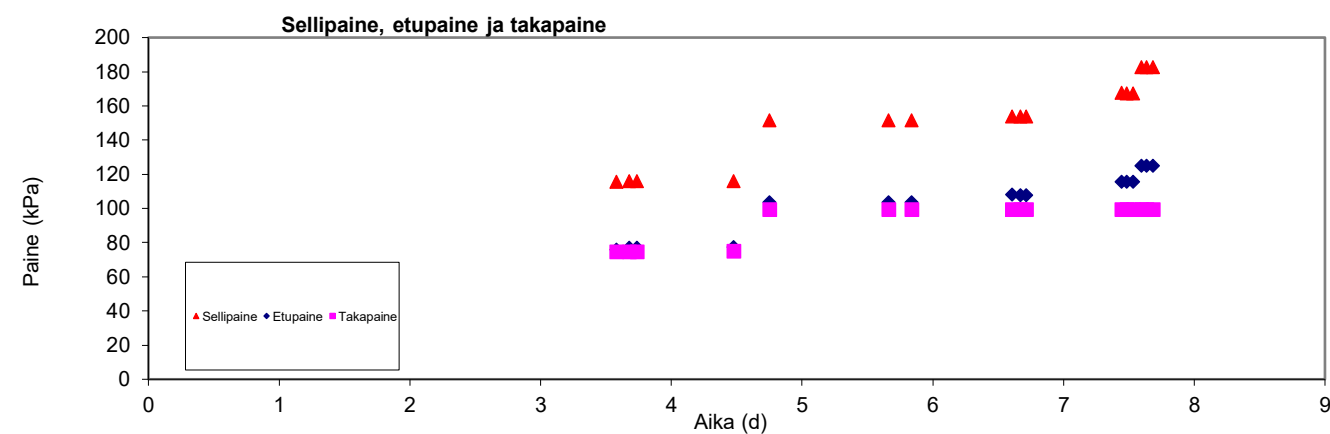
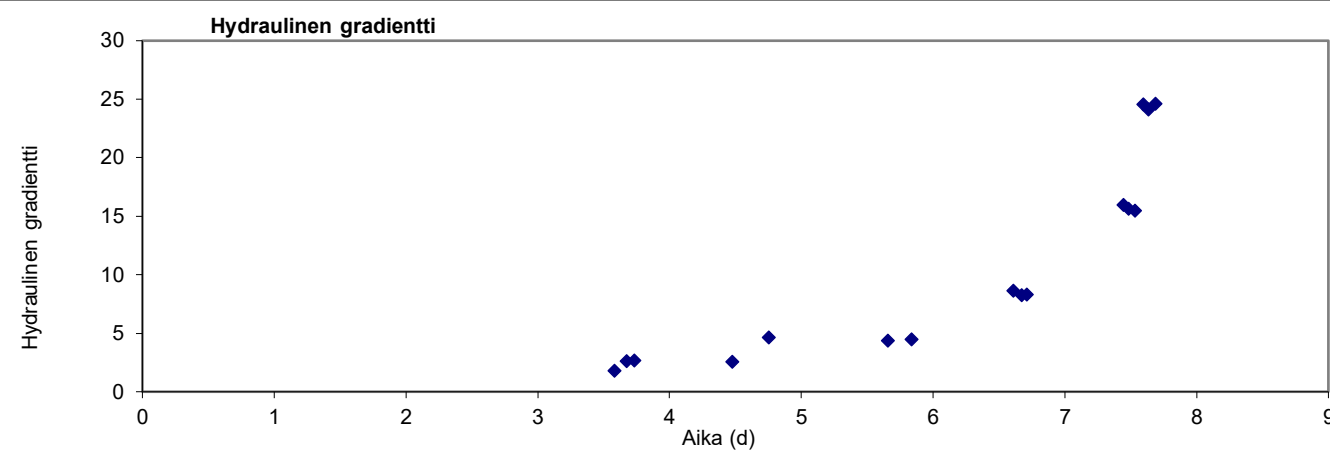


Liite 4 (4). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	2,4E-08	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,16	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,57	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	107,7	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1943	g
Vesipitoisuus	9	%
Tilavuuspaino	21,87	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,07	kN/m3
Tiivysaste	93,12	%
Kyllästysaste	80,71	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	108	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1988	g
Vesipitoisuus	11,5	%
Tilavuuspaino	22,32	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,02	kN/m3
Tiivysaste	92,88	%
Kyllästysaste	101,98	%

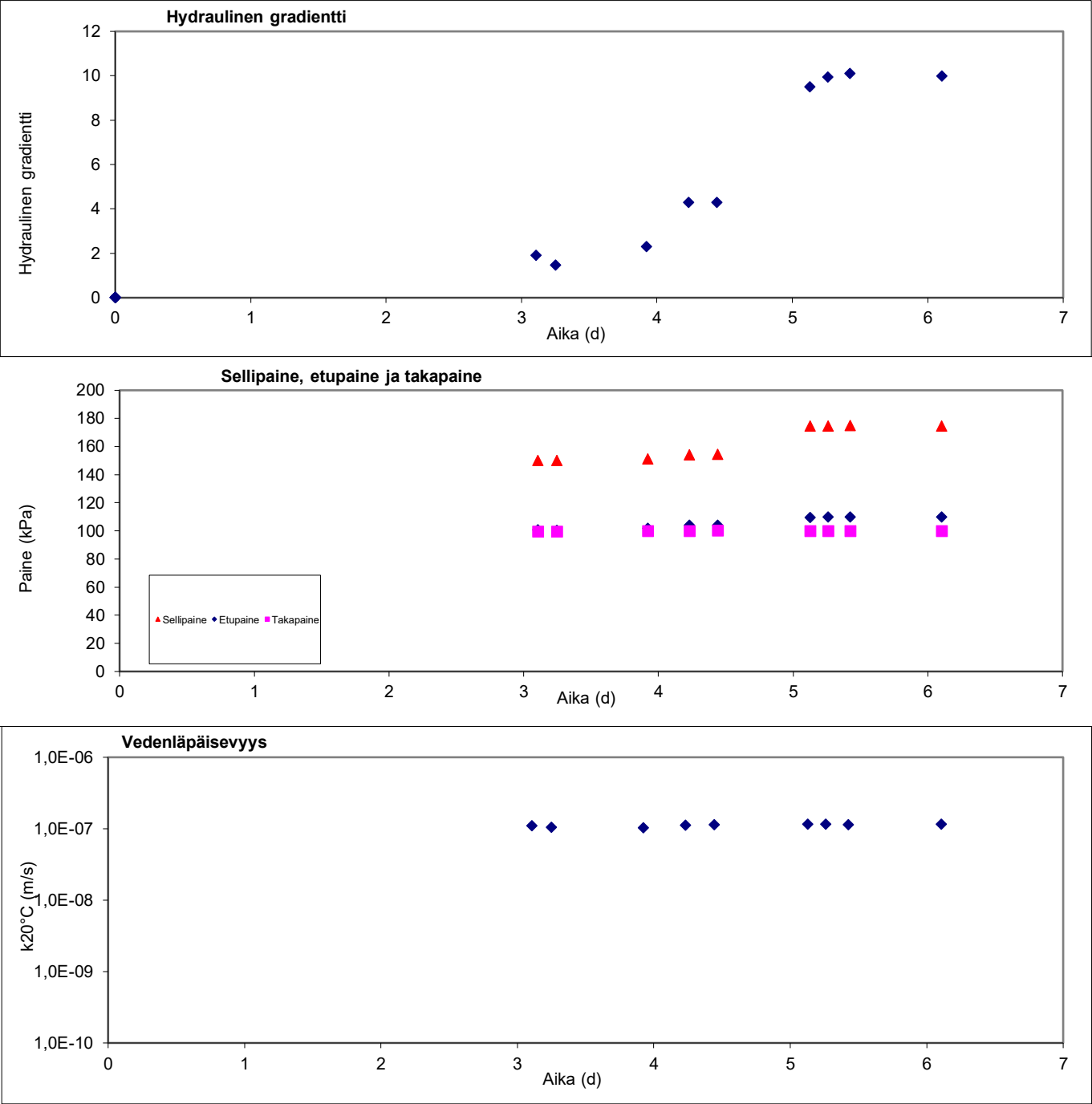


Liite 4 (5). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,10E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P3	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,29	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,71	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1864	g
Vesipitoisuus	7,34	%
Tilavuuspaino	20,71	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,30	kN/m3
Tiivysaste	88,89	%
Kyllästysaste	56,03	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1962,2	g
Vesipitoisuus	12,57	%
Tilavuuspaino	21,73	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,30	kN/m3
Tiivysaste	88,9	%
Kyllästysaste	96,00	%

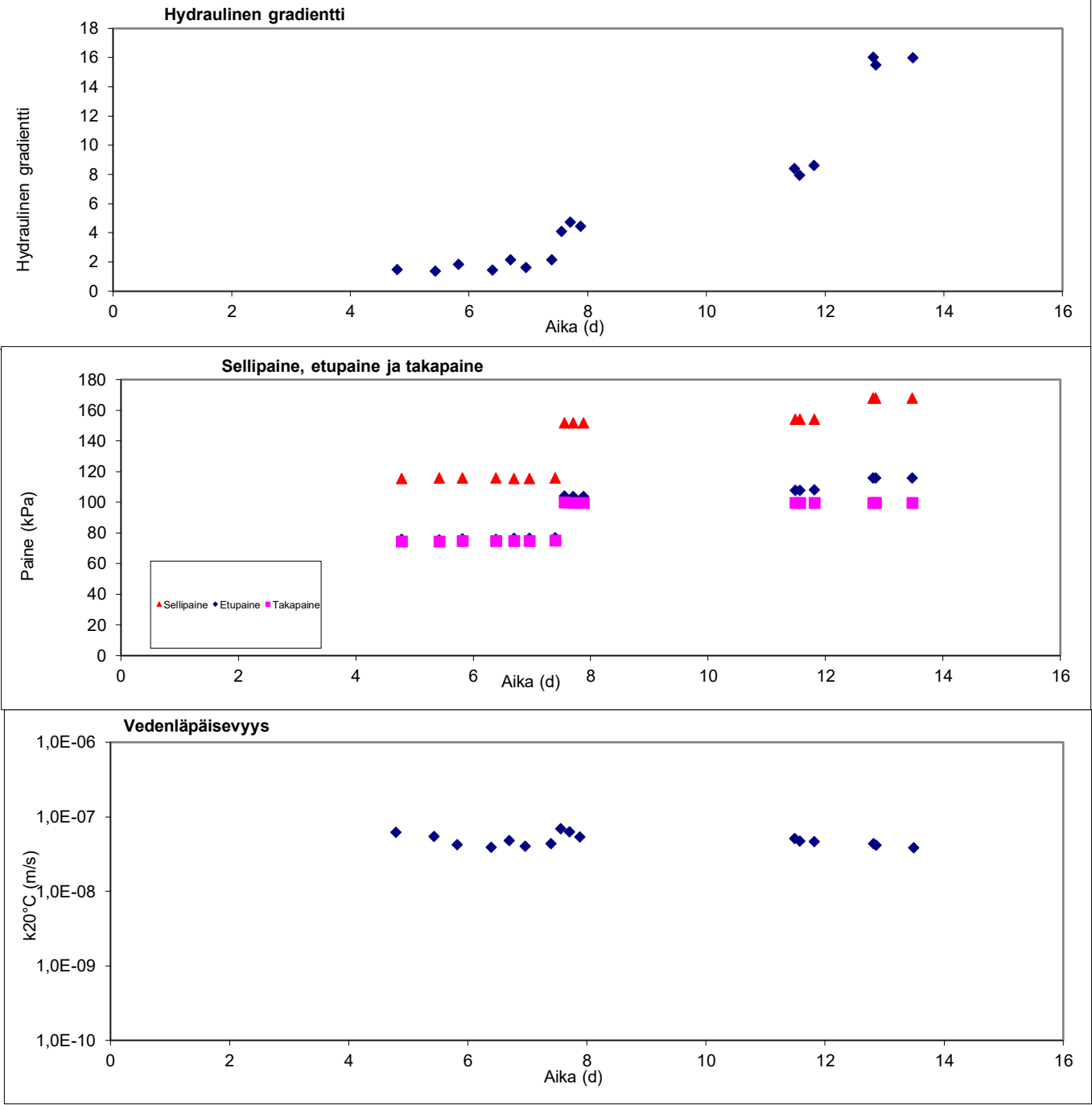


Liite 4 (6). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	4,20E-08	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S1P3	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,29	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,71	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	108	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1896	g
Vesipitoisuus	9	%
Tilavuuspaino	21,28	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,53	kN/m3
Tiivysaste	89,94	%
Kyllästysaste	71,99	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	107,9	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1948	g
Vesipitoisuus	12,02	%
Tilavuuspaino	21,89	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,54	kN/m3
Tiivysaste	90	%
Kyllästysaste	96,40	%

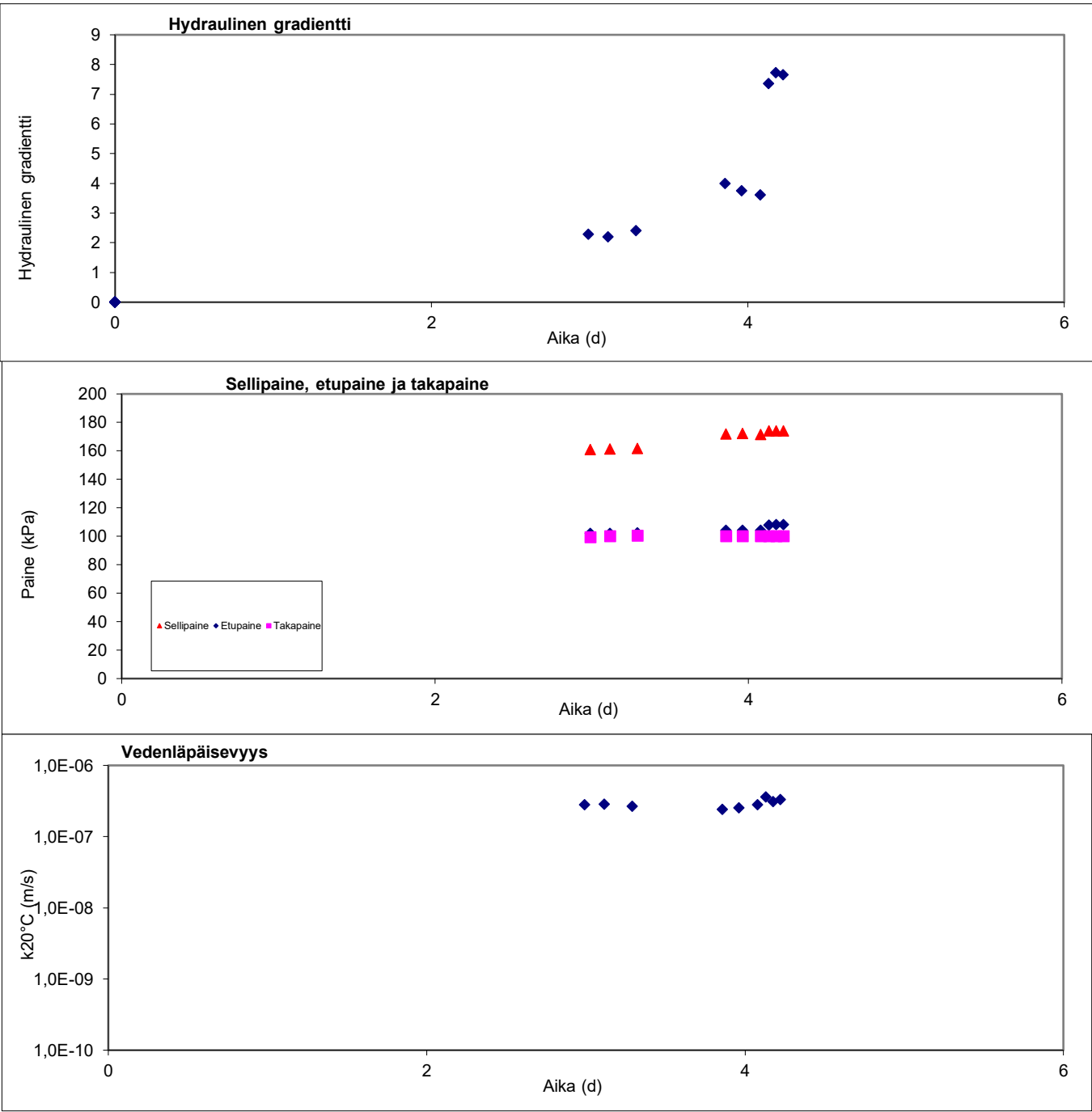


Liite 4 (7). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	3,2E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	6,9	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,52	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1947,6	g
Vesipitoisuus	6,97	%
Tilavuuspaino	21,64	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,23	kN/m3
Tiivysaste	94,02	%
Kyllästysaste	64,84	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,3	mm
Halkaisija	101,6	mm
Massa	2005,3	g
Vesipitoisuus	10,28	%
Tilavuuspaino	22,20	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,13	kN/m3
Tiivysaste	93,54	%
Kyllästysaste	93,49	%

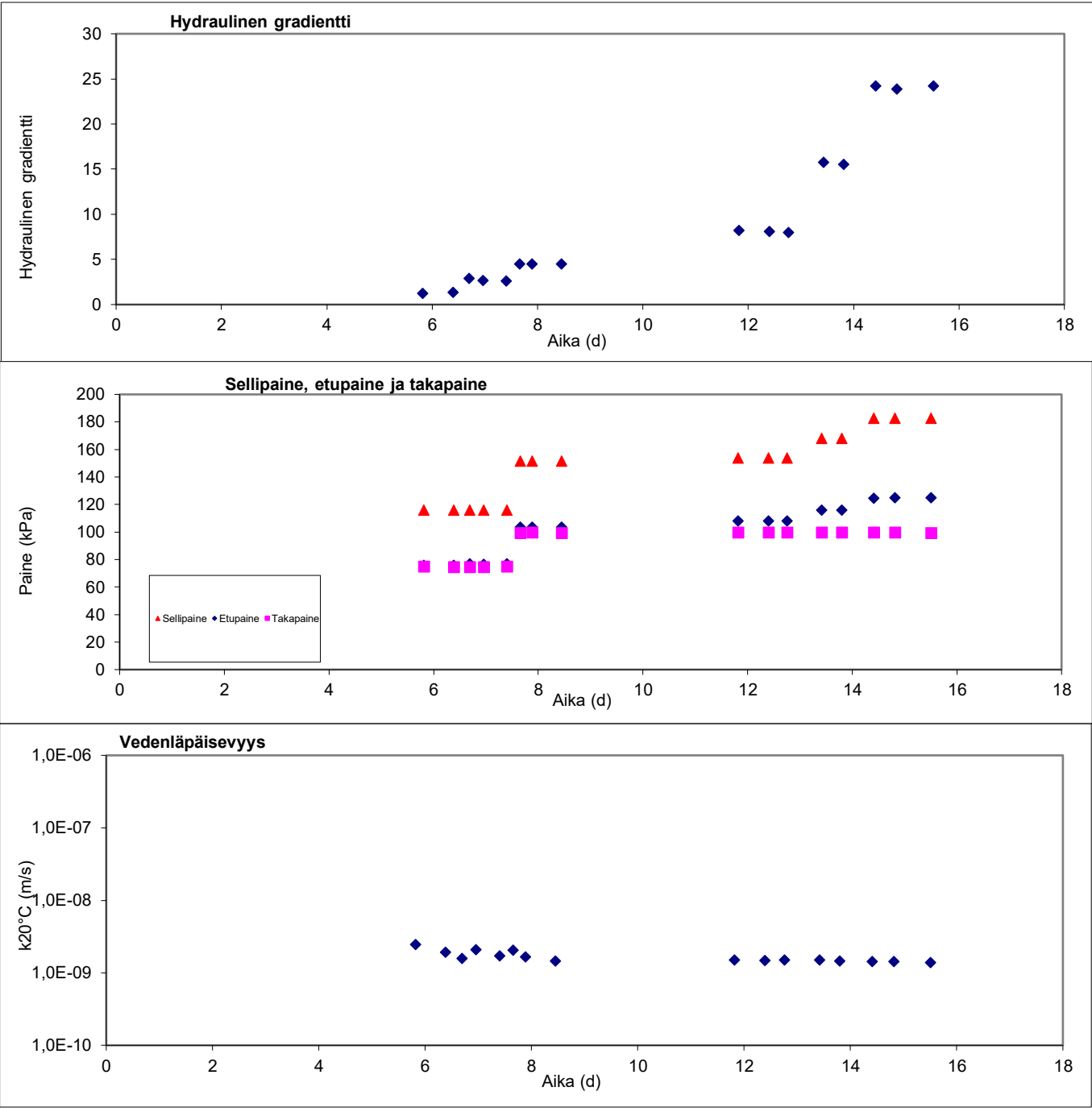


Liite 4 (8). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,4E-09	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	6,9	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,52	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	108,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1980	g
Vesipitoisuus	8,8	%
Tilavuuspaino	22,21	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,41	kN/m3
Tiivysaste	94,85	%
Kyllästysaste	85,21	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	108,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2002	g
Vesipitoisuus	9,75	%
Tilavuuspaino	22,45	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,46	kN/m3
Tiivysaste	96,07	%
Kyllästysaste	95,46	%

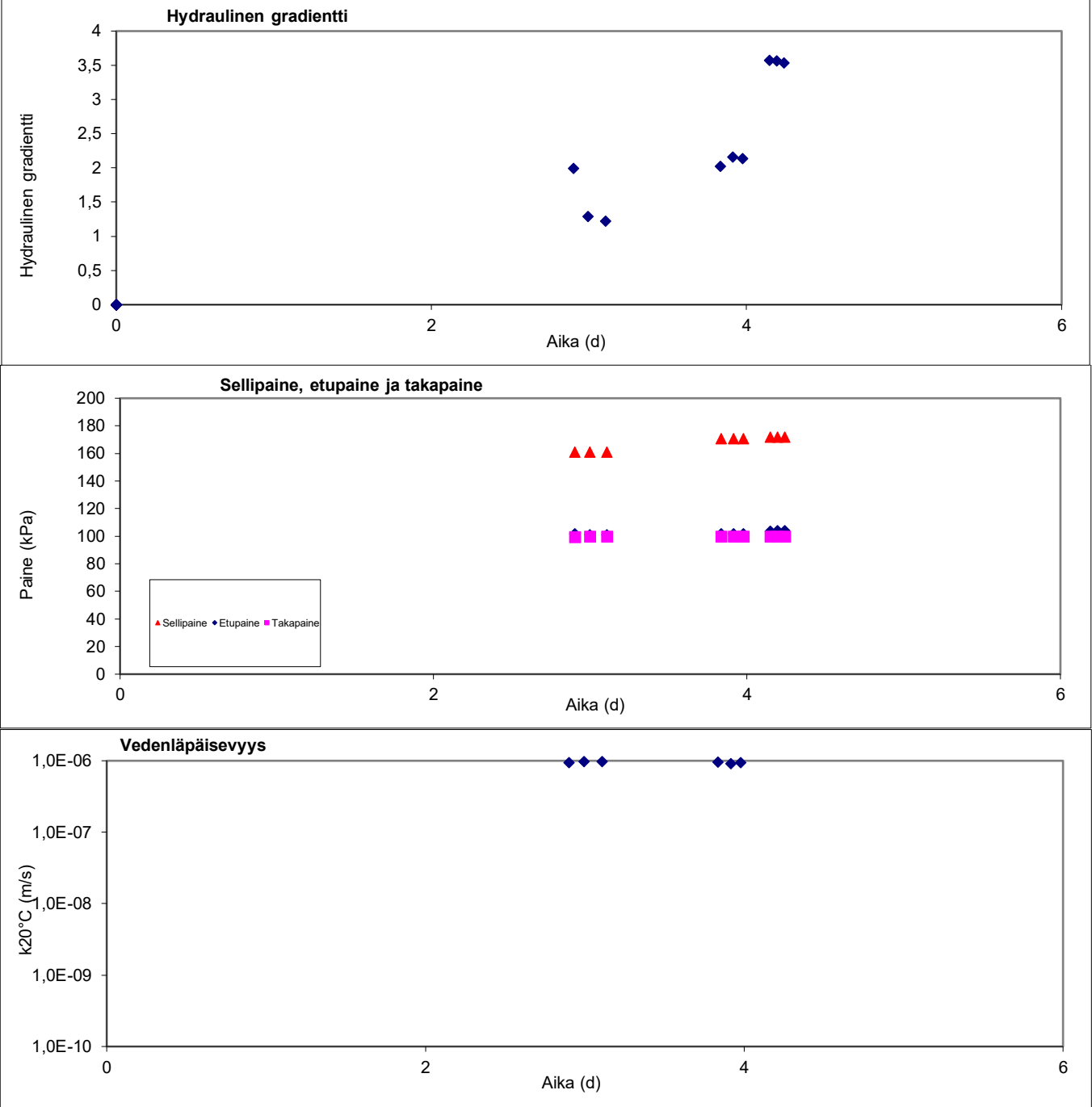


Liite 4 (9). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,0E-06	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,84	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,41	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1947,6	g
Vesipitoisuus	7,49	%
Tilavuuspaino	21,64	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,14	kN/m3
Tiivysaste	94,05	%
Kyllästysaste	68,18	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,8	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2010,7	g
Vesipitoisuus	10,86	%
Tilavuuspaino	22,20	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,03	kN/m3
Tiivysaste	93,54	%
Kyllästysaste	96,55	%

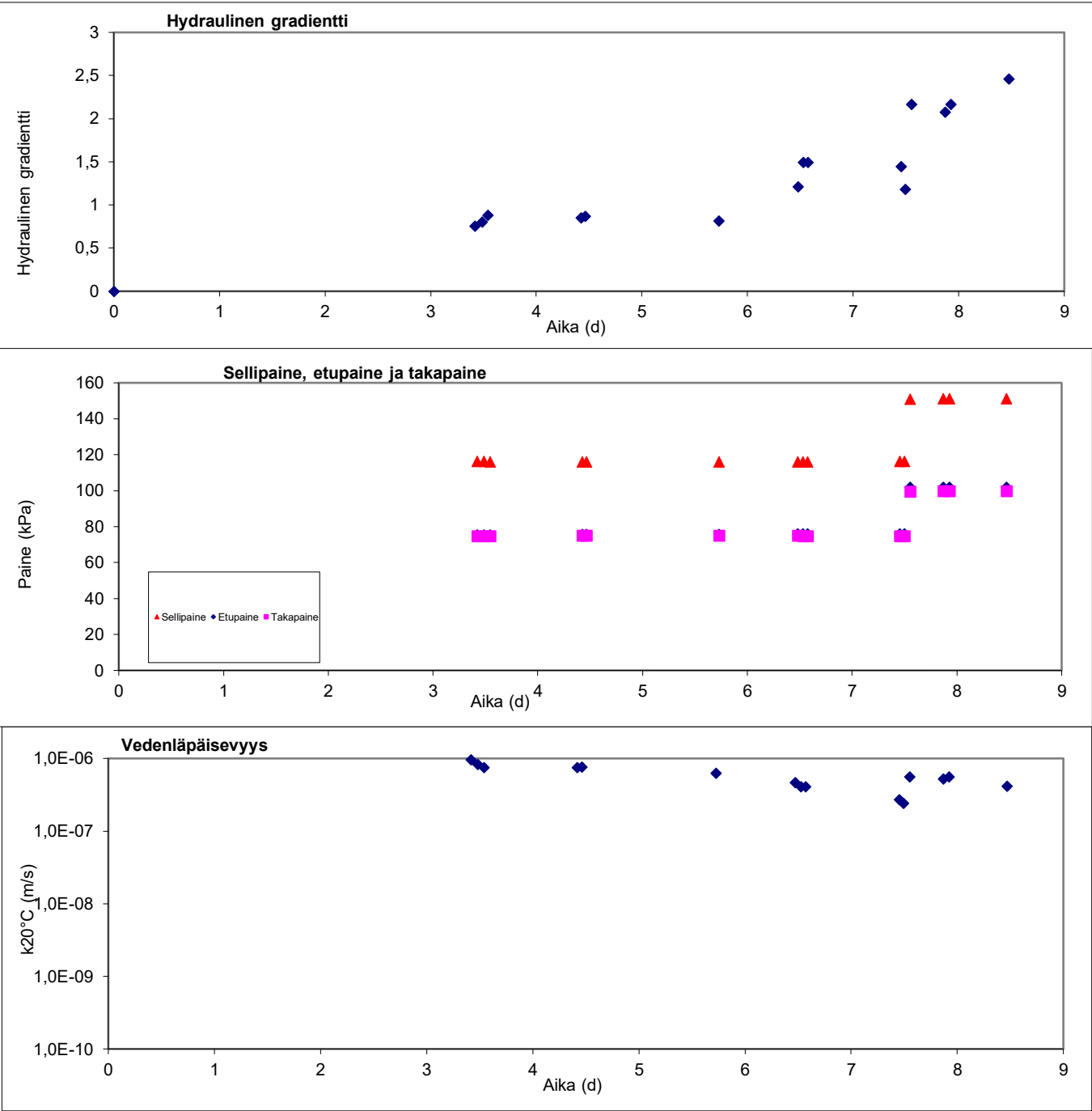


Liite 4 (10). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	4,0E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,84	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,41	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	108,7	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1932	g
Vesipitoisuus	9,01	%
Tilavuuspaino	21,55	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,77	kN/m3
Tiivysaste	92,33	%
Kyllästysaste	75,78	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	108,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1975	g
Vesipitoisuus	10,98	%
Tilavuuspaino	22,15	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,96	kN/m3
Tiivysaste	93,22	%
Kyllästysaste	96,19	%

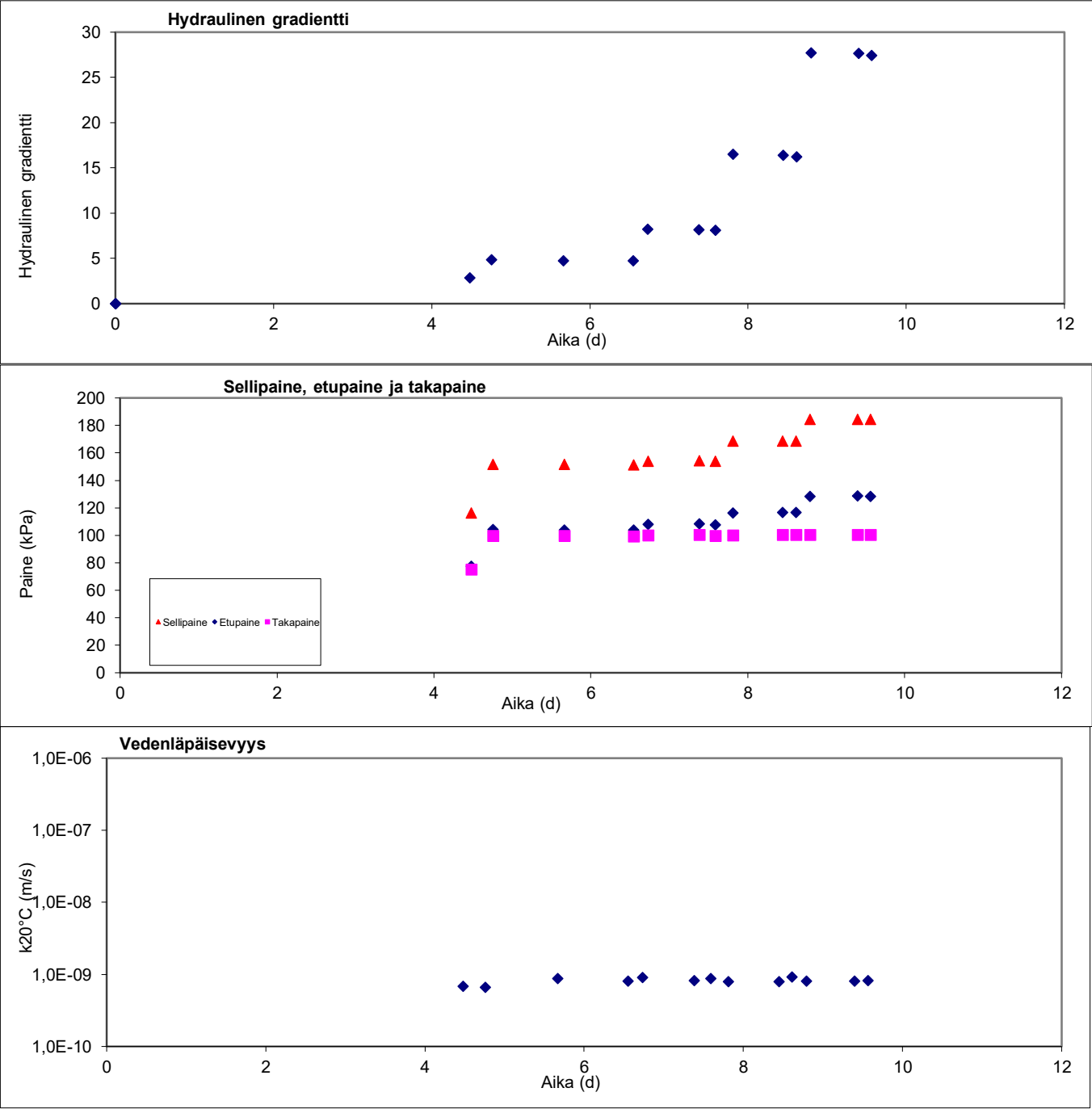


Liite 4 (11). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	8,1E-10	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,84	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,41	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	106,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1960	g
Vesipitoisuus	10,75	%
Tilavuuspaino	22,31	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,15	kN/m3
Tiivysaste	94,10	%
Kyllästysaste	98,12	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	105,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1964	g
Vesipitoisuus	10,44	%
Tilavuuspaino	22,57	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,44	kN/m3
Tiivysaste	95,45	%
Kyllästysaste	101,69	%

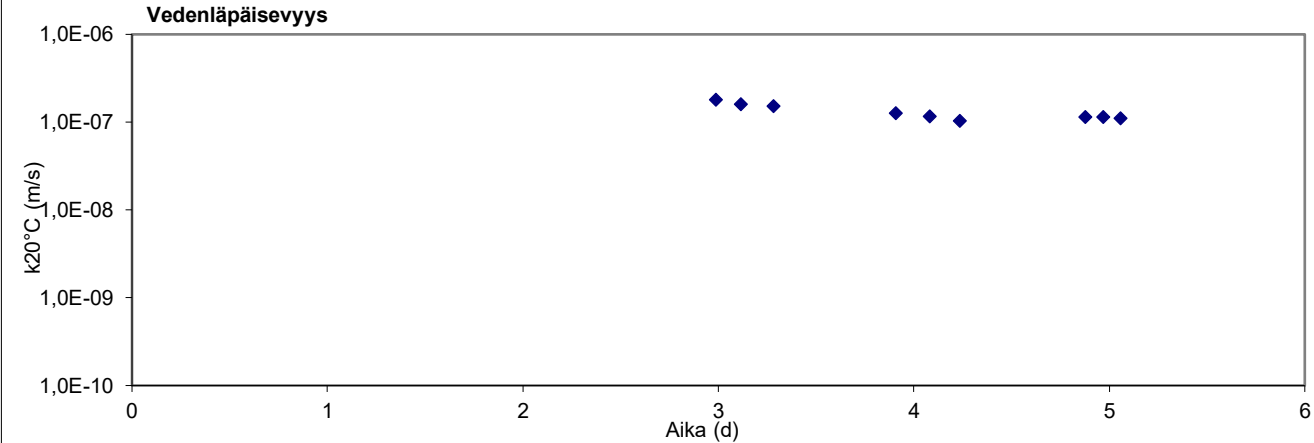
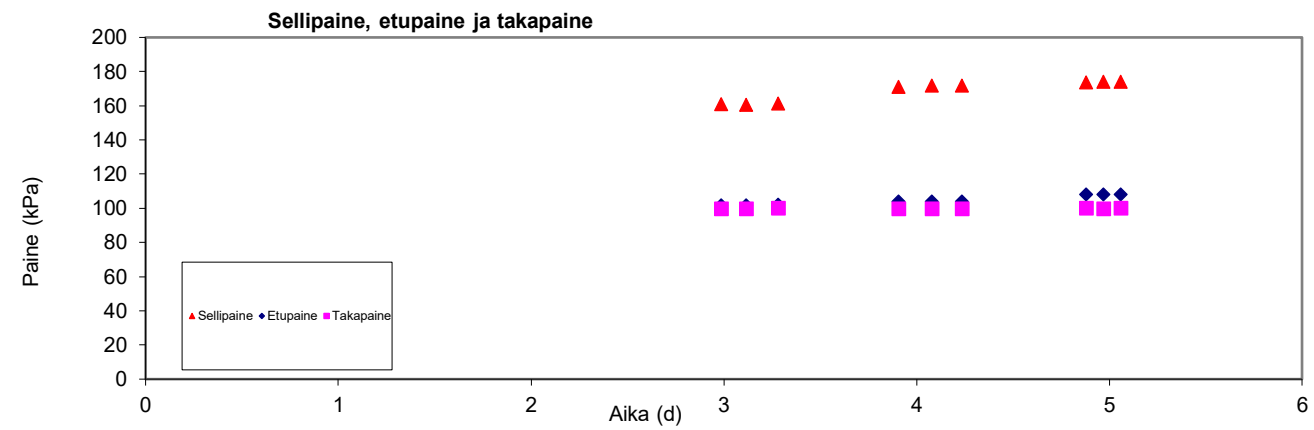
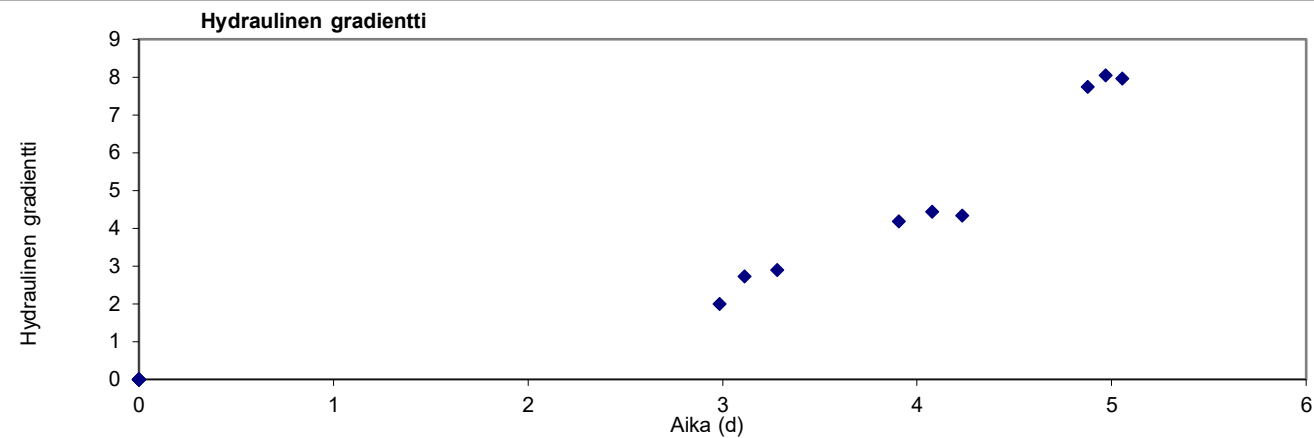


Liite 4 (12). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,1E-07	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P3	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	6,8	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,75	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,1	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1966,2	g
Vesipitoisuus	6,85	%
Tilavuuspaino	21,85	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,45	kN/m3
Tiivysaste	94,02	%
Kyllästysaste	66,92	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,8	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2017,9	g
Vesipitoisuus	9,45	%
Tilavuuspaino	22,28	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,36	kN/m3
Tiiviysaste	93,60	%
Kyllästysaste	90,41	%

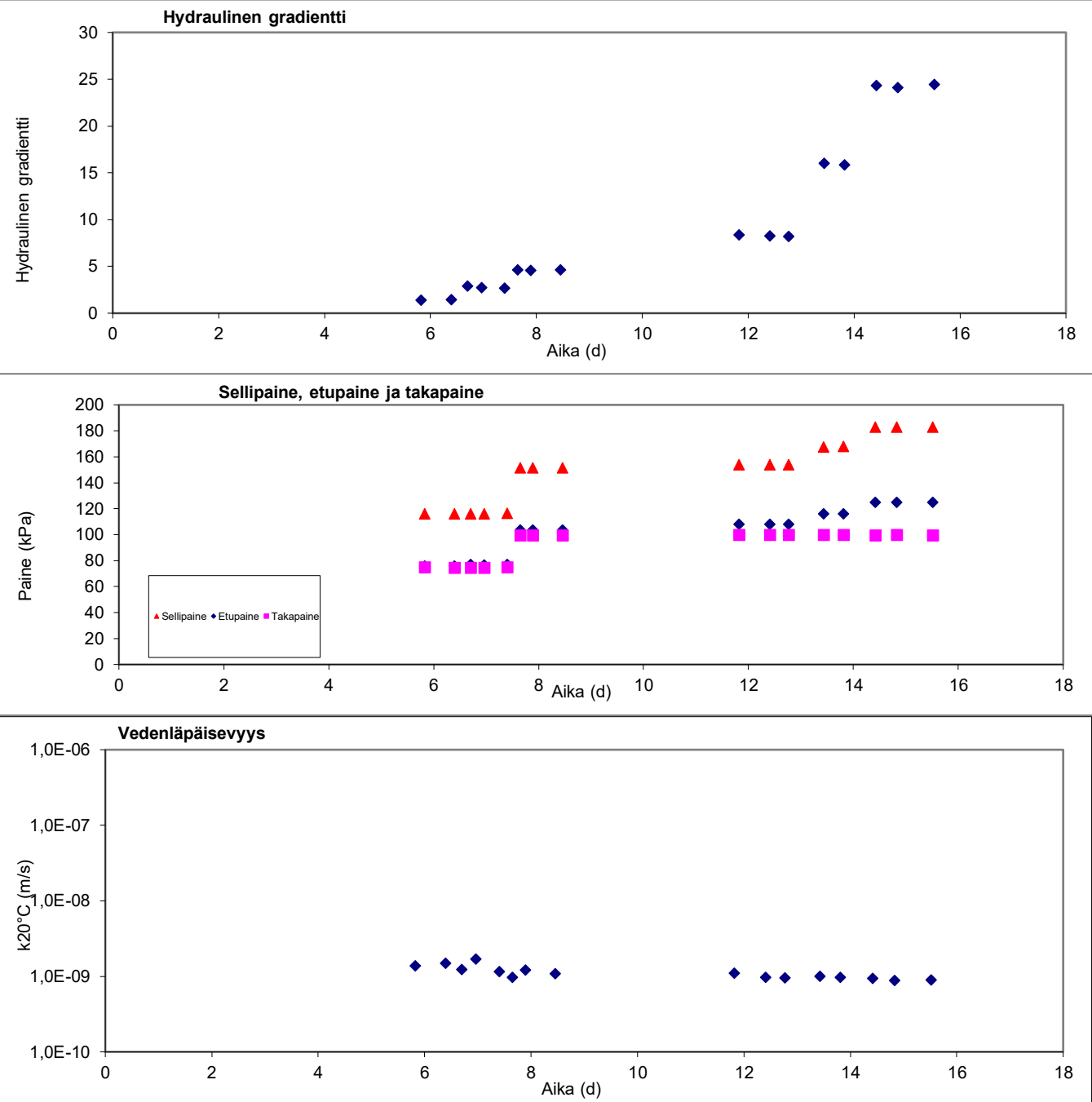


Liite 4 (13). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	9,2E-10	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S2P3	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	6,8	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,75	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	107,85	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2003	g
Vesipitoisuus	8,8	%
Tilavuuspaino	22,52	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,70	kN/m3
Tiivysaste	95,15	%
Kyllästysaste	91,05	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	107,3	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2014	g
Vesipitoisuus	9,56	%
Tilavuuspaino	22,76	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,77	kN/m3
Tiivysaste	95,50	%
Kyllästysaste	100,70	%



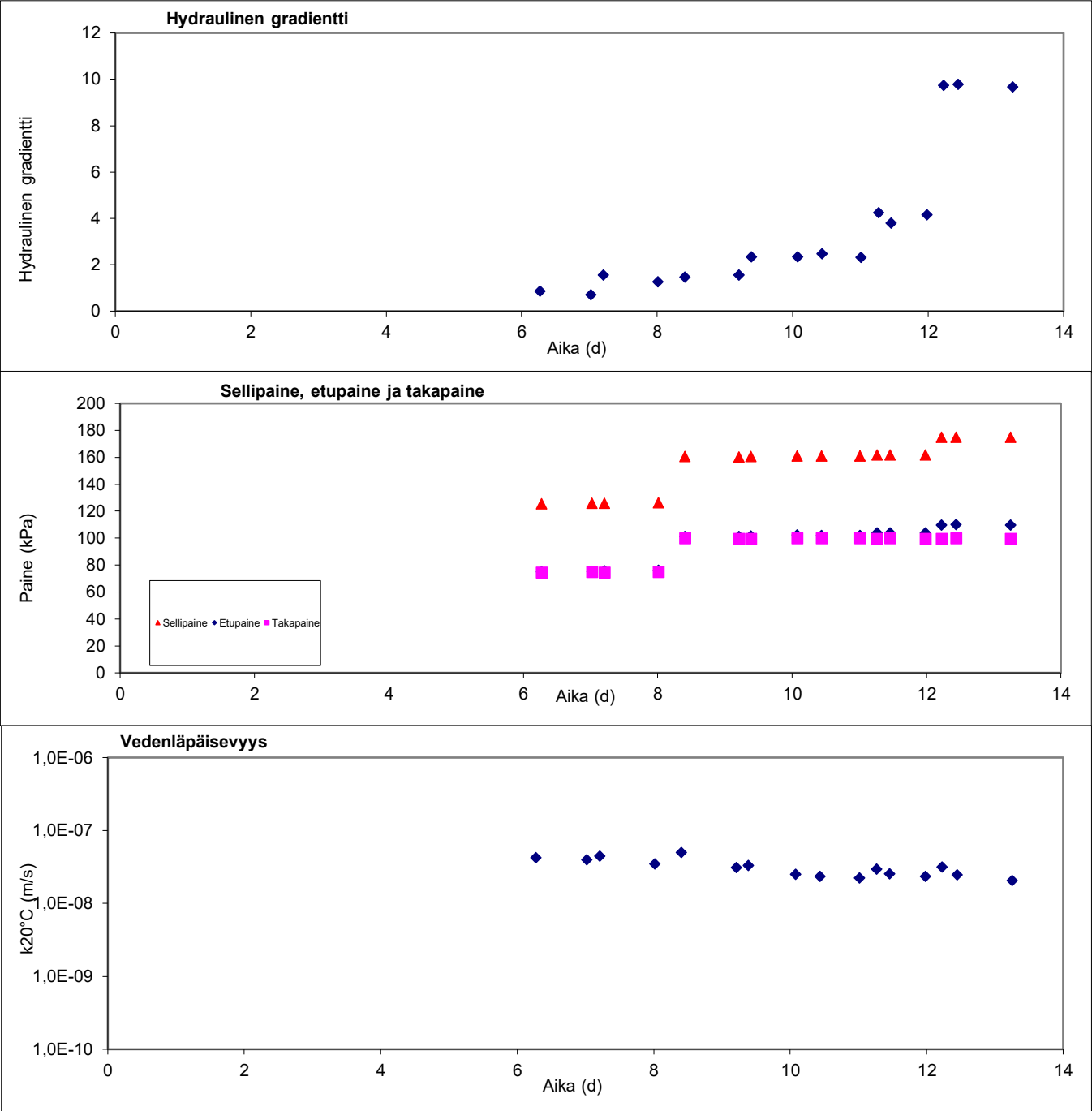
Liite 4 (14). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	2,4E-08	m/s
--------------------------	---------	-----

MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S3P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,5	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,68	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	108,6	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2005,6	g
Vesipitoisuus	7,18	%
Tilavuuspaino	22,39	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,89	kN/m3
Tiivysaste	96,36	%
Kyllästysaste	77,85	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	108,6	mm
Halkaisija	101,8	mm
Massa	2055	g
Vesipitoisuus	9,73	%
Tilavuuspaino	22,81	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,78	kN/m3
Tiivysaste	95,87	%
Kyllästysaste	102,82	%

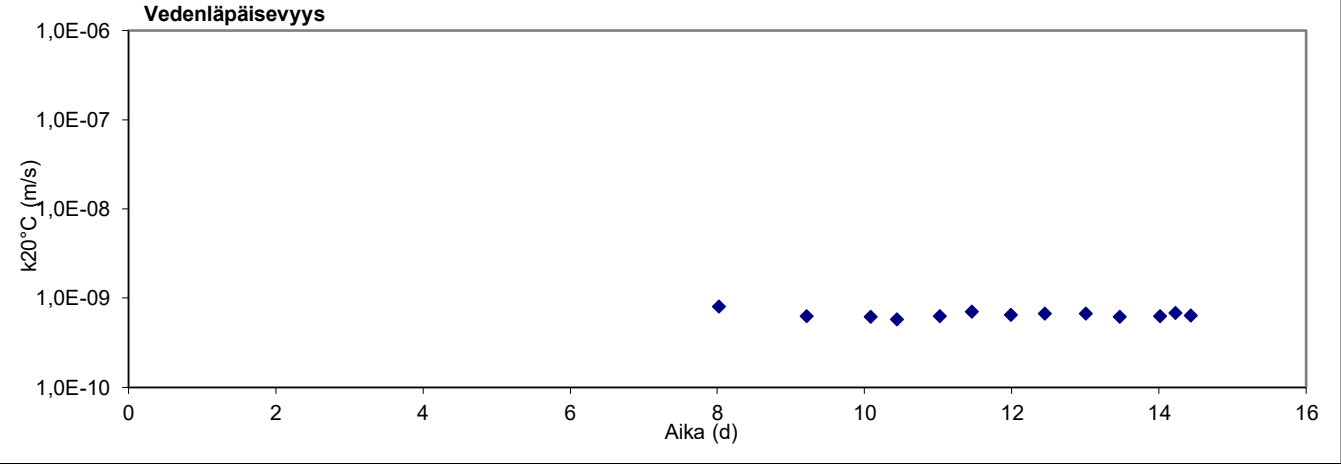
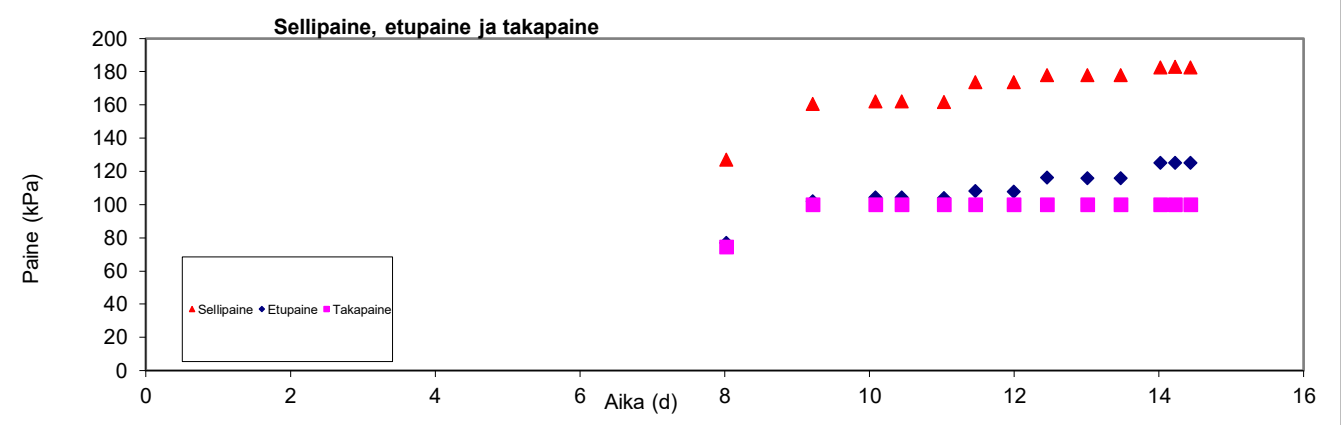
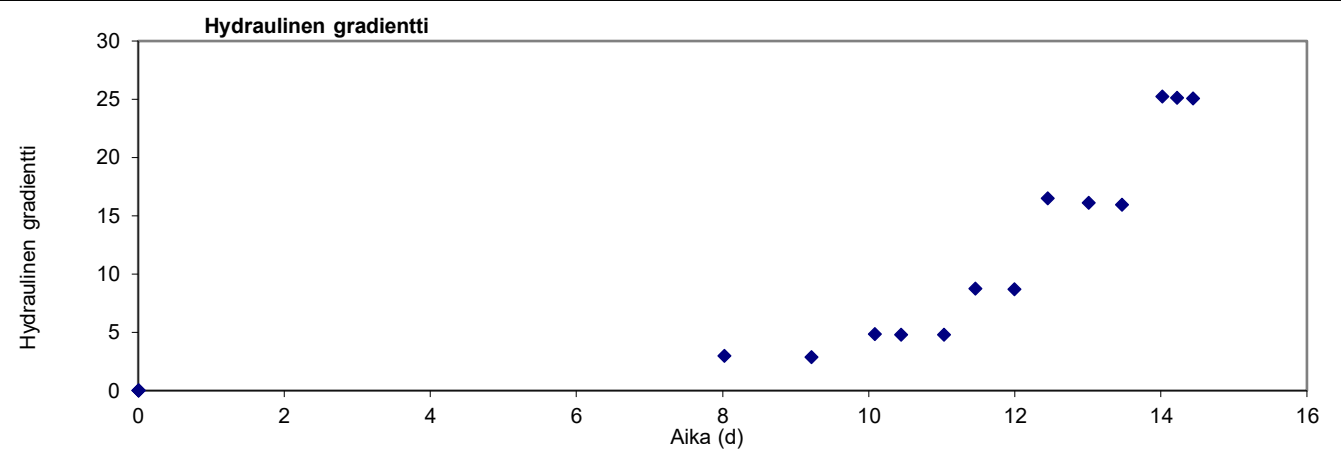


Liite 4 (15). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	6,3E-10	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S3P1	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,5	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,68	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	106	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1954	g
Vesipitoisuus	8,79	%
Tilavuuspaino	22,35	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,54	kN/m3
Tiivysaste	94,76	%
Kyllästysaste	87,76	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	105,3	mm
Halkaisija	102,1	mm
Massa	1974	g
Vesipitoisuus	10,08	%
Tilavuuspaino	22,46	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,41	kN/m3
Tiivysaste	94,12	%
Kyllästysaste	97,48	%

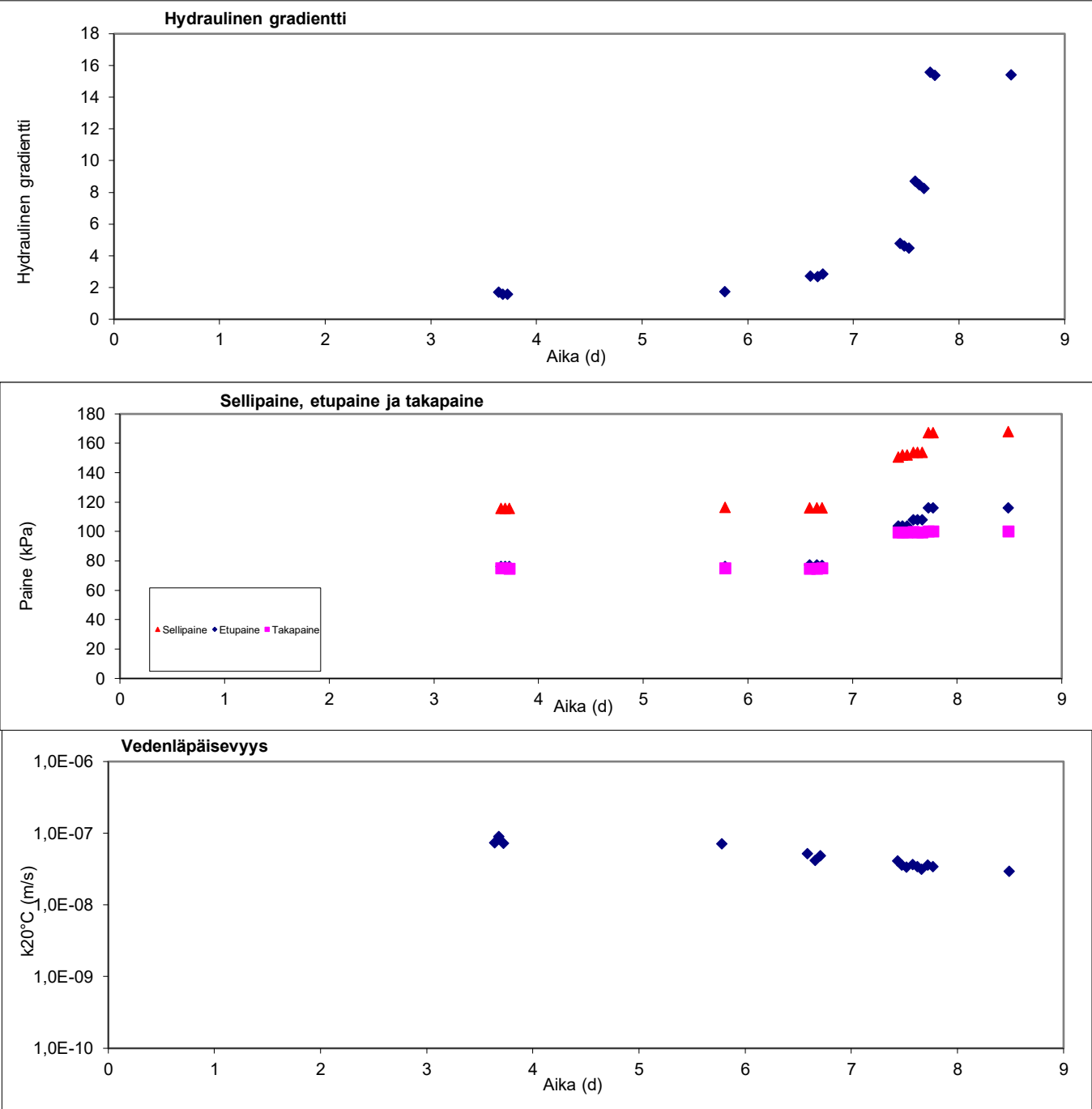


Liite 4 (16). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	3,3E-08	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S3P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	ilmakuivatettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,16	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,57	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	109,3	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1909	g
Vesipitoisuus	6,88	%
Tilavuuspaino	21,18	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,81	kN/m3
Tiivysaste	91,85	%
Kyllästysaste	58,41	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	109,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1989	g
Vesipitoisuus	11,3	%
Tilavuuspaino	22,02	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,79	kN/m3
Tiiviysaste	91,73	%
Kyllästysaste	95,41	%

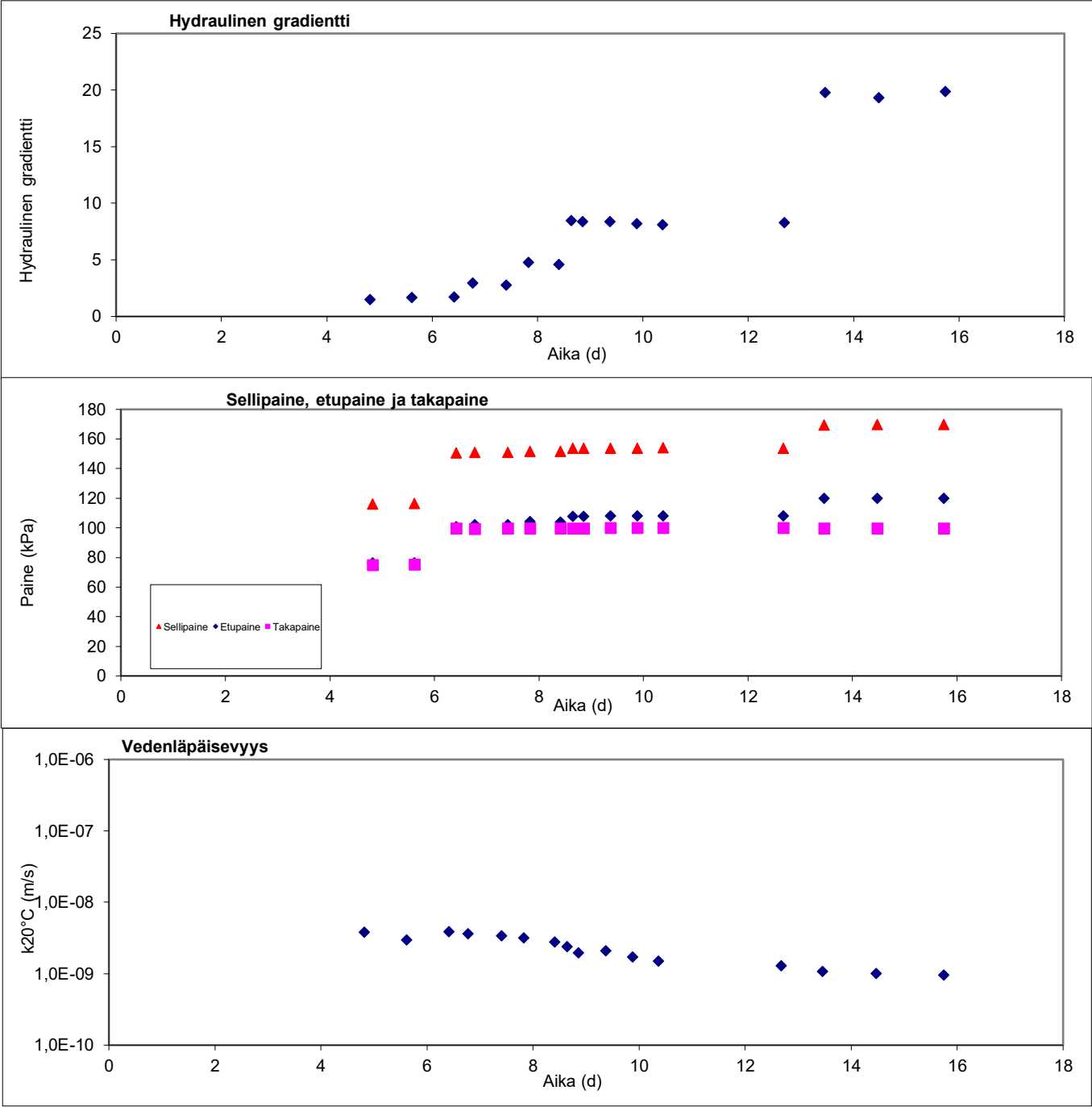


Liite 4 (17). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	1,0E-09	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S3P2	
Materiaali	HkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	7,16	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,57	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	107,9	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1930	g
Vesipitoisuus	9	%
Tilavuuspaino	21,69	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	19,90	kN/m3
Tiivysaste	92,24	%
Kyllästysaste	77,78	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	107,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	1957	g
Vesipitoisuus	10,28	%
Tilavuuspaino	22,07	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	20,01	kN/m3
Tiivysaste	92,79	%
Kyllästysaste	91,13	%

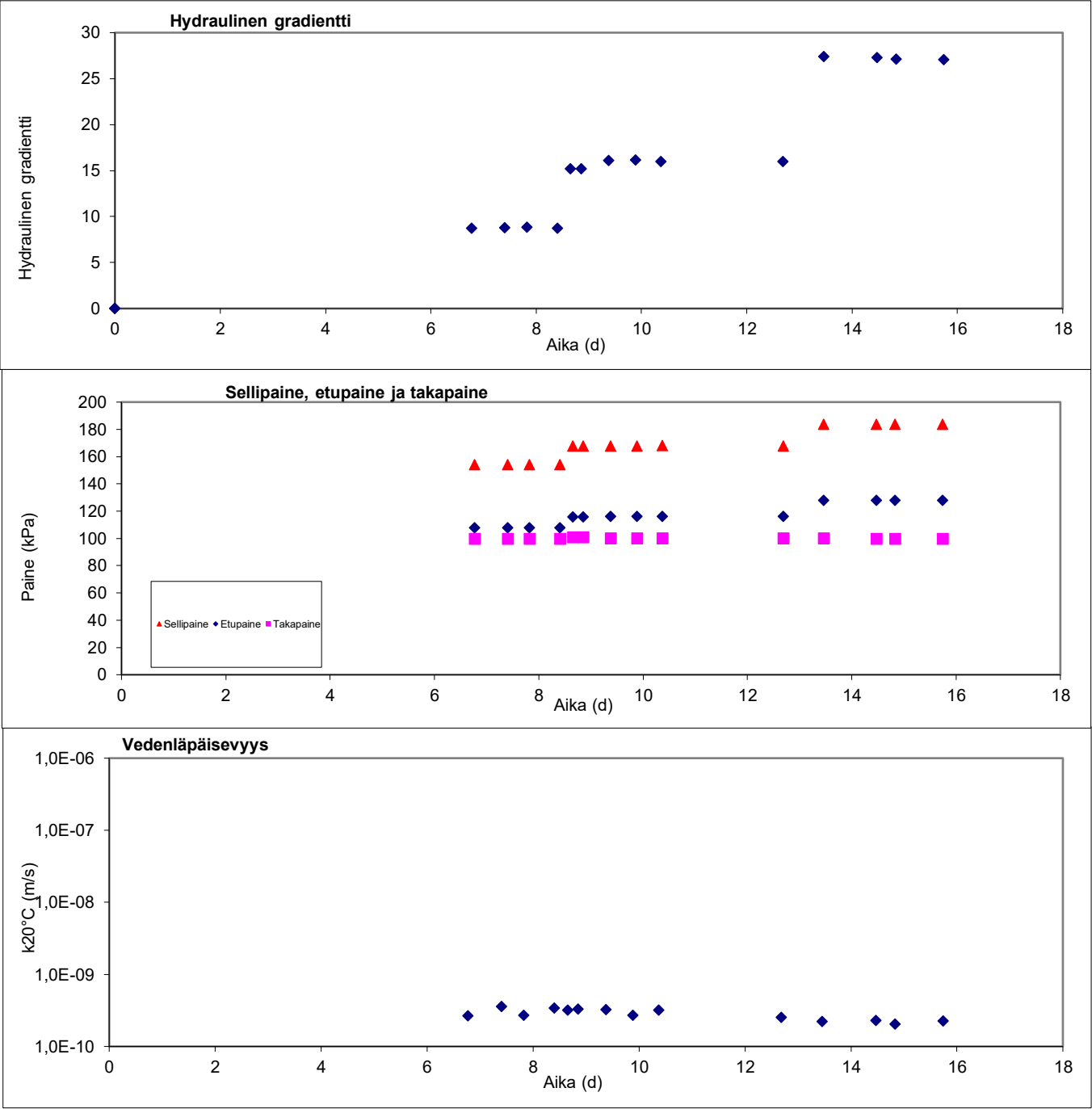


Liite 4 (18). Vedenläpäisevyyskokeet muuttuvapaineisena joustavaseinäisessä sellissä

Vedenläpäisevyys (k20°C)	2,2E-10	m/s
MATERIAALI TIEDOT		
Tutkimuspiste	S3P3	
Materiaali	siHkMr	
Näytteen käsittely	Kostutettu	
Syöttövesi	keitetty Di-vesi	
Optimivesipitoisuus	6,87	%
Maksimikuivatilavuuspaino	21,72	kN/m³
Kiintotiheys	2,65	t/m³
Mittauslämpötila	21	°C

NÄYTE, ENNEN KOETTA		
Korkeus	106,75	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2018	g
Vesipitoisuus	8,98	%
Tilavuuspaino	22,92	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	21,03	kN/m3
Tiivysaste	96,83	%
Kyllästysaste	100,78	%

NÄYTE, KOKEEN JÄLKEEN		
Korkeus	106,5	mm
Halkaisija	101,5	mm
Massa	2017	g
Vesipitoisuus	9,26	%
Tilavuuspaino	22,96	kN/m3
Kuivatilavuuspaino	21,02	kN/m3
Tiivysaste	96,76	%
Kyllästysaste	103,54	%



Liite 5 (1). Vedenläpäisevyyden arviointi rakeisuuteen perustuvilla laskentamenetelmillä

Tutkimuspiste / näyte	Raekoon tunnusluvut (mm)			Cu= d ₆₀ /d ₁₀	Laboratorion ved.läp. kokeen jälkeinen laskettu n	Vedenläpäisevyys rakeisuuden perusteella (m/s)						Mitattu arvo (m/s)	
	d ₁₀ (mm)	d ₂₀ (mm)	d ₆₀ (mm)			Breyer	Kozeny- Carman	Hazen	Slitcher	Terzaghi (C = 0,0084)	USBR	Laboratorio	In-situ
S1P1 (ilmakuivattu)	0,0069	0,027	0,45	65,2	0,250	2,5E-07	1,1E-07	2,5E-07	4,9E-08	6,8E-08	1,2E-06	1,50E-07	1,40E-07
S1P1 (kostutettu)	0,0069	0,027	0,45	65,2	0,203	2,5E-07	5,1E-08	1,2E-07	2,5E-08	2,4E-08	1,2E-06	2,80E-09	
S1P2 (ilmakuivattu)	0,0046	0,0185	0,5	108,7	0,275	8,2E-08	6,8E-08	1,4E-07	3,0E-08	4,6E-08	4,9E-07	1,60E-07	7,50E-08
S1P2 (kostutettu)	0,0046	0,0185	0,5	108,7	0,240	8,2E-08	4,1E-08	1,0E-07	1,9E-08	2,5E-08	4,9E-07	2,40E-08	
S1P3 (ilmakuivattu)	0,0067	0,021	0,46	68,7	0,269	2,3E-07	1,3E-07	2,9E-07	5,9E-08	8,8E-08	6,5E-07	1,10E-07	1,60E-07
S1P3 (kostutettu)	0,0067	0,021	0,46	68,7	0,259	2,3E-07	1,2E-07	2,6E-07	5,2E-08	7,5E-08	6,5E-07	4,20E-08	
S2P1 (ilmakuivattu)	0,0063	0,035	0,43	68,3	0,232	2,0E-07	6,9E-08	1,7E-07	3,2E-08	4,1E-08	2,1E-06	3,20E-07	7,50E-08
S2P1 (kostutettu)	0,0063	0,035	0,43	68,3	0,220	2,0E-07	5,7E-08	1,4E-07	2,7E-08	3,2E-08	2,1E-06	1,40E-09	
S2P2 (ilmakuivattu)	0,0051	0,037	0,41	80,4	0,239	1,2E-07	5,0E-08	1,2E-07	2,3E-08	3,0E-08	2,4E-06	1,00E-06	9,60E-08
S2P2 (kostutettu)	0,0051	0,037	0,41	80,4	0,241	1,2E-07	5,2E-08	1,2E-07	2,4E-08	3,2E-08	2,4E-06	4,00E-07	
S2P2 (kostutettu)	0,0051	0,037	0,41	80,4	0,222	1,2E-07	3,8E-08	9,5E-08	1,8E-08	2,2E-08	2,4E-06	8,10E-10	
S2P3 (ilmakuivattu)	0,0063	0,033	0,41	65,1	0,224	2,1E-07	6,0E-08	1,5E-07	2,8E-08	3,4E-08	1,8E-06	1,10E-07	4,10E-08
S2P3 (kostutettu)	0,0063	0,033	0,41	65,1	0,208	2,1E-07	4,7E-08	1,1E-07	2,2E-08	2,3E-08	1,8E-06	9,20E-10	
S3P1 (ilmakuivattu)	0,0039	0,022	0,37	94,9	0,203	6,4E-08	1,6E-08	3,9E-08	7,9E-09	7,8E-09	7,2E-07	2,40E-08	7,60E-08
S3P1 (kostutettu)	0,0039	0,022	0,37	94,9	0,214	6,4E-08	2,0E-08	4,8E-08	9,4E-09	1,0E-08	7,2E-07	6,30E-10	
S3P2 (ilmakuivattu)	0,0050	0,022	0,38	76,0	0,249	1,2E-07	5,5E-08	1,3E-07	2,5E-08	3,5E-08	7,2E-07	3,30E-08	5,00E-08
S3P2 (kostutettu)	0,0050	0,022	0,38	76,0	0,238	1,2E-07	4,7E-08	1,1E-07	2,2E-08	2,9E-08	7,2E-07	1,00E-09	
S3P3 (kostutettu)	0,0045	0,019	0,38	84,4	0,199	9,2E-08	2,0E-08	4,6E-08	9,8E-09	9,1E-09	5,2E-07	2,20E-10	4,80E-08

Liite 6 (1). Muualla tehdyt laboratorio- ja in-situ -tutkimukset

LABORATORIO 1 (LAB1) (muuttuvapaine jäykkäseinäisessä sellissä)										
Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	Raekokosuhte (d60/d10)	Vedenläpäisevyys (m/s)	Vesipitoisuus (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (kokeen jälkeen)	Tiiviysaste (%) (ennen koetta)	Tiiviysaste (%) (kokeen jälkeen)
-	18,5	0,013	0,4	61,5	9,60E-09	9,3	83,05	-	91,96	-
-	17,5	0,015	1,5	733,3	1,10E-08	9,4	82,38	-	91,98	-
-	20,5	0,013	0,3	26,9	8,00E-09	12	99,25	-	92,00	-
-	25,5	0,0075	0,35	69,3	1,90E-08	12	93,73	-	92,00	-
-	22,5	0,012	0,35	35,0	4,80E-08	11,1	95,35	-	91,98	-
-	22	0,017	0,4	44,1	3,00E-09	10,1	81,85	-	91,97	-
-	30	0,0085	0,24	47,1	1,20E-09	10,5	88,38	-	91,96	-
-	22,5	0,009	0,28	41,1	1,30E-09	12,8	101,84	-	91,99	-
-	18,5	0,014	0,75	200,0	2,40E-09	11,1	97,54	-	92,04	-
-	33	0,006	0,22	58,3	9,80E-10	9,5	81,55	-	91,96	-
-	23	0,01	0,3	45,0	1,70E-09	9,3	77,02	-	92,03	-
-	16,5	0,017	0,45	47,1	3,60E-08	14,3	105,64	-	91,99	-
-	25,5	0,007	0,35	85,7	1,00E-09	10,1	75,93	-	91,97	-
-	21,5	0,014	0,4	42,9	1,60E-09	8,1	71,17	-	92,04	-
-	20	0,016	0,47	55,0	1,00E-09	9,4	85,79	-	91,99	-
-	23,5	0,009	0,33	61,1	1,40E-08	11,6	105,78	-	91,98	-
-	25	0,012	0,49	116,7	4,60E-09	12	85,40	-	91,95	-
-	20	0,013	0,55	103,8	2,60E-09	9,8	87,63	-	91,99	-
-	18,5	0,011	0,78	204,5	4,90E-09	10,1	88,50	-	91,98	-
-	32,5	0,0053	0,25	107,5	7,30E-10	8,7	76,25	-	91,99	-

Liite 6 (2). Muualla tehdyt laboratorio- ja in-situ -tutkimukset

LABORATORIO 1 (LAB1) (muuttuvapaine jäykkäseinäisessä sellissä)										
Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	Raekokosuhte (d60/d10)	Vedenläpäisevyys (m/s)	Vesipitoisuus (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (kokeen jälkeen)	Tiiviysaste (%) (ennen koetta)	Tiiviysaste (%) (kokeen jälkeen)
-	35	0,005	0,18	64,0	1,60E-09	9,5	78,57	-	92,00	-
-	21	0,01	2	820,0	1,20E-08	10,5	86,77	-	91,98	-
-	33	0,0043	0,18	69,8	8,70E-09	12,2	93,54	-	92,00	-
-	22,5	0,0075	0,35	80,0	3,60E-09	9,9	85,08	-	91,99	-
-	27,5	0,0078	0,3	57,7	1,40E-08	13,2	105,17	-	92,02	-
-	22	0,01	0,5	125,0	4,90E-10	9,1	84,81	-	92,01	-
-	39,5	0,0045	0,13	52,2	9,10E-09	11,9	91,14	-	91,97	-
-	23,5	0,0065	0,35	100,0	1,10E-09	9,3	83,05	-	91,96	-
-	23,5	0,0085	0,33	74,1	7,30E-09	10,6	96,62	-	91,97	-
-	27,5	0,006	0,33	121,7	7,10E-09	13,2	90,70	-	91,96	-
-	32,5	0,0055	0,23	76,4	1,00E-09	9,9	88,36	-	91,95	-
-	20	0,012	0,7	216,7	6,30E-09	10,2	89,40	-	91,99	-
-	23	0,0073	0,4	115,1	1,70E-09	9,2	82,13	-	91,95	-
-	29,5	0,01	0,4	190,0	1,50E-09	12,4	91,59	-	91,98	-
-	16	0,024	3	395,8	3,90E-07	10,4	89,33	-	91,98	-
-	16,5	0,025	1,1	132,0	2,00E-08	13,2	92,36	-	91,98	-
-	24	0,01	0,28	39,0	6,00E-09	8,3	74,23	-	91,99	-
-	26,5	0,006	0,26	63,3	1,10E-09	9,6	91,17	-	91,97	-
-	23	0,01	0,35	60,0	4,40E-10	7,9	75,07	-	91,98	-

Liite 6 (3). Muualla tehdyt laboratorio- ja in-situ -tutkimukset

LABORATORIO 2 (LAB2) (muuttuvapaine joustavaseinäisessä sellissä)										
Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	Raekokosuhde (d60/d10)	Vedenläpäisevyys (m/s)	Vesipitoisuus (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (kokeen jälkeen)	Tiiviysaste (%) (ennen koetta)	Tiiviysaste (%) (kokeen jälkeen)
4,4	29,8	0,0055	0,23	69,1	3,2E-08	5,9	53,08	83,72	93,24	91,57
3,7	27,7	0,007	0,273	64,3	6,8E-08	6	57,6	78,21	92,44	86,70
4,1	28,2	0,005	0,273	100,0	3,4E-08	5,9	56,06	84,35	94,40	92,13
4,6	28,1	0,0047	0,229	76,6	8,0E-08	6,1	50,63	78,23	91,20	88,71
4,5	29,8	0,0062	0,211	53,2	3,8E-08	6,4	53,91	87,94	90,73	89,45
-	30,5	0,0054	0,276	103,7	9,6E-08	6,3	53,7	88,8	93,29	90,33
-	34,4	0,0052	0,194	65,4	7,3E-08	6,7	55,45	80,89	93,16	87,03
4,3	24,5	0,012	0,294	35,0	9,2E-08	6,1	51,26	85	92,37	91,67
-	25,7	0,01	0,321	58,0	7,1E-08	6,5	56,88	89,25	93,02	93,67

LABORATORIO 4 (LAB4) (vakioapaine joustavaseinäisessä sellissä)										
Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	Raekokosuhde (d60/d10)	Vedenläpäisevyys (m/s)	Vesipitoisuus (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (kokeen jälkeen)	Tiiviysaste (%) (ennen koetta)	Tiiviysaste (%) (kokeen jälkeen)
3	26,9	0,012	0,28	39,2	1,1E-09	10,1	100,01	103,71	92,47	92,83
4,5	31,3	0,0061	0,2	57,4	2,8E-09	8,8	67,01	103,42	91,59	91,59

Liite 6 (4). Muualla tehdyt laboratorio- ja in-situ -tutkimukset

LABORATORIO 3 (LAB3) (muuttuvapaine joustavaseinäisessä sellissä)										
Saviaines (%)	Hienoaines (%)	d10 (mm)	d50 (mm)	Raekokosuhte (d60/d10)	Vedenläpäisevyys (m/s)	Vesipitoisuus (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (%) (ennen koetta)	Kyllästysaste (kokeen jälkeen)	Tiiviysaste (%) (ennen koetta)	Tiiviysaste (%) (kokeen jälkeen)
-	35,3	0,0052	0,13	38,5	4,20E-08	9,6	70,88	91,48	91,93	91,91
5,9	23,6	0,007	0,35	100,0	5,30E-08	8,9	61,51	100,90	91,95	92,84
7,6	27	0,004	0,44	325,0	3,30E-10	12,7	81,85	94,77	91,96	91,75
6,3	20,5	0,007	0,47	171,4	2,30E-07	11,3	67,27	99,77	91,95	91,27
5,2	22,4	0,009	0,35	63,3	1,10E-08	10,9	91,59	96,63	91,95	91,99
6,7	27,3	0,0055	0,35	123,6	1,90E-08	10,5	78,62	97,29	91,96	91,93
6,5	31,4	0,0028	0,185	103,6	1,60E-07	8,3	88,24	79,98	91,93	91,91
6,3	27,5	0,008	0,25	50,0	1,80E-07	8,6	77,55	97,84	91,93	91,35
-	31,8	0,0048	0,17	56,3	1,40E-08	10,1	100,34	87,81	91,93	92,00
5,5	33,2	0,0045	0,185	68,9	1,60E-07	8,3	99,45	89,18	91,93	89,14
5,9	28,1	0,007	0,26	57,1	1,50E-07	9,1	98,26	99,22	91,93	92,38
4,5	25,5	0,01	0,26	40,0	4,20E-09	10,2	86,68	89,10	91,97	91,32
6,8	34,2	0,0035	0,16	68,6	2,60E-09	11,3	76,54	104,78	91,93	91,11
3	26,8	0,012	0,245	30,8	7,00E-08	9,7	73,75	84,18	91,93	89,78
6,9	22,5	0,008	0,6	275,0	6,80E-09	10,6	85,07	102,90	91,97	92,81
-	27,3	0,018	0,28	26,7	5,40E-07	9,3	67,67	89,86	92,11	92,20
-	24,7	0,025	0,33	27,2	1,80E-07	9	68,12	93,85	92,17	93,15
-	27,4	0,015	0,27	31,3	1,30E-08	9,6	68,32	76,36	91,95	92,97
-	30,4	0,011	0,2	30,0	2,00E-07	8,7	66,83	96,71	92,08	92,63
-	30,1	0,014	0,215	24,3	8,50E-08	9,7	71,53	96,12	91,94	92,19

Liite 6 (5). Muualla tehdyt laboratorio- ja in-situ -tutkimukset

Guelph peameametri vedenläpäisevyys (m/s)	Troxler-laitteella mitattu tiiveysaste (Guelph-permeametri) (%)	Double ring infiltrometri vedenläpäisevyys (m/s)	Troxler-laitteella mitattu tiiveysaste (Double ring infiltrometri) (%)
3,7E-07	-	4,4E-06	-
1,1E-07	-	1,1E-06	-
6,0E-08	-	4,9E-06	-
1,4E-07	-	5,6E-07	-
2,5E-08	-	1,3E-06	-
2,5E-08	-	1,6E-07	91,9-94,2
8,3E-09	91,9-94,2	4,8E-08	92,9-101,4
8,7E-08	91,9	1,1E-07	95,4-97,1
6,2E-09	92,9-101,4		